

一种可提高无线传感器网络寿命的节能 方案设计

刘雪松 武 杰

(中国科学技术大学 近代物理系 核探测与核电子学国家重点实验室 合肥 230026)

摘要 在某核物理实验中的传感器网络数据采集系统中,由于采集节点能量消耗不均衡,系统能量利用不充分,不能满足长时间可靠采集数据的需求。为解决该问题,研究了较为普遍的无线传感器网络能量不均衡问题,提出了一种对无线传感器网络电源系统的改造方案。该方案在保留了传感器无线通信的基础上,通过在传感器节点之间增布电源线,实现了两方面的改善:首先,增加了节点之间的能量转移通道,解决了节点之间能量消耗不均衡的问题;其次,在能量均衡的基础上传感器节点可以按照能量最优方案进行通信,避免了传统无线传感器网络中因簇通信而导致的能量浪费问题。仿真数据表明:与一般分簇协议相比,该方案可使节点平均能耗降低 78%,使系统寿命延长约 5 倍。

关键词 无线传感器网络, 能量均衡, 电源线连接, 能量最优通信路径

中图分类号 TL81

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2019.hjs.42.050401

Design of an energy-effective scheme to improve lifetime of wireless sensor networks

LIU Xuesong WU Jie

(State Key Laboratory of Particle Detection & Electronics, Department of Modern Physics,
University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract [Background] In the data acquisition system for a nuclear physics experiment, the energy consumption of each acquisition node of wireless sensor networks is not balanced, and the energy utilization of the system is insufficient, which cannot satisfy the task of reliable data acquisition for a long time. [Purpose] This study aims to solve the common problem of energy imbalance of wireless sensor networks, and put forward a transformation scheme of power supply system for wireless sensor networks. [Methods] On the basis of reserving wireless sensor communication, the scheme achieves two improvements by adding power lines between sensor nodes. Firstly, the energy transfer channels between nodes are increased to solve the problem of unbalanced energy consumption between nodes. Secondly, on the basis of energy balance, sensor nodes communicate with the optimal energy scheme to avoid energy waste caused by frequent clusters in traditional wireless sensor networks. [Results] The results show that this method can prolong the life of the system about five times at the cost of connecting a few power lines.

国家自然科学基金(No.41574106)、国家科技重大专项(No.2017ZX05008-008-041)、国家重大科研装备研制项目(No.ZDYZ2012-1-05-03)资助
第一作者: 刘雪松, 男, 1991 年出生, 2014 年毕业于中国科学技术大学, 现为博士研究生, 研究领域为大规模数据获取系统和深部资源勘探地球物理仪器设备

通信作者: 武杰, E-mail: wujie@ustc.edu.cn

收稿日期: 2019-01-11, 修回日期: 2019-03-28

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.41574106), Major National Science and Technology Special Program of China (No. 2017ZX05008-008-041), R&D of Key Instruments and Technologies for Deep Resources Prospecting (No.ZDYZ2012-1-05-03)

First author: LIU Xuesong, male, born in 1991, graduated from University of Science and Technology of China in 2014, doctoral student, focusing on large-scale data acquisition systems and geophysical instruments for deep resource exploration

Corresponding author: WU Jie, E-mail: wujie@ustc.edu.cn

Received date: 2019-01-11, revised date: 2019-03-28

[Conclusion] The simulation results show that compared with clustering protocol, this scheme can reduce the average power consumption of nodes by 78% and prolong the system life by about 5 times.

Key words Wireless sensor network, Energy balance, Power line connected, Energy optimal routing

无线传感器网络在工业控制、城市管理、环境监测等领域有广泛应用,网络覆盖区域中的大量传感器节点协作地感知、采集和处理感知对象的信息,通过无线通信方式将获取的信息传送给用户终端。在文献[1]中用无线传感器网络构建了核电站环境辐射连续监测系统,并对无线传感器网络的关键技术进行了探讨,参考其中的监测系统,我们设计完成了一个无线传感器网络用于监测某核物理实验的环境参数。实验区域中分布有数百个采集节点,节点采集数据通过无线通信方式实时传输到控制中心处理,如图1所示。经过前期的实验验证,采集节点各项技术指标均达到实验要求。但在后期的实验中,由于每次实验持续时间较长,所以对采集节点数提出了能够持续长时间稳定工作的需求。然而目前采集节点采用的供电电池电量有限,无法满足要求的工作时间。

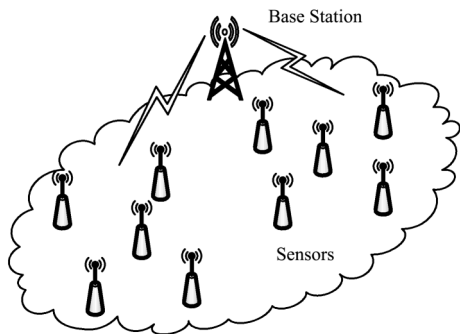


图1 无线传感器网络应用
Fig.1 Application of wireless sensor networks

解决电能供应不足最直接的方法是通过多节电池并联或串联的方式构成电池组来增大电池的容量。但在实验中发现常用的锂离子电池经常有断路或短路的情况出现。当多节电池串联或并联时,因为电池组中任何一节电池出现故障都会造成整个电池组失效,因此使得整个电池组出现故障的概率相比单节电池大大增加。由于在该核物理实验中,不能频繁进入场地更换电池,同时因电池组故障造成的数据采集中断也是不能容忍的。

因此本文研究了另外一种可以保证系统长时间工作的方案,首先分析了无线传感器网络无法长时间连续工作原因,然后给出了该方案的原理。

1 无线传感器网络能量均衡问题分析

在图1所示的无线传感器网络应用中,采集节点可以通过直接或多跳的方式将数据发送给基站。节点的能耗和发送数据量以及发送距离有关,距离基站远和承担转发任务多的节点能耗较高,造成能量不均衡,部分节点会提前耗尽能量。无线传感器网络中的一个研究热点是解决能量不均衡问题。

常用的解决方案是应用分簇路由协议,其基本思想是将所有采集节点划分为若干个簇,簇内定期选举簇头,簇头收集簇内数据并发送给基站,使簇内其他节点减少了发送数据的能量消耗。低能量自适应分簇层次(Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy, LEACH)协议是无线传感器网络中典型的分簇协议^[2],采用随机分簇、周期性选举簇头、簇头数据单跳发送至基站的策略,每个采集节点成为簇头概率相等,簇内能量消耗相等,但由于各个簇距离中心节点距离不同,所以簇间能耗有差异,较远的簇更早死亡。有很多协议对LEACH做出一些改进,大多关注分簇方式、簇头选举、路由方式等问题,如混合节能分布式分簇(Hybrid Energy-Efficient Distributed Clustering, HEED)协议^[3]、节能簇状构造(Energy-efficient Cluster Formation, EECF)协议^[4]、能量感知聚类层次结构(Energy Aware Clustering Hierarchy Protocol, EACHP)协议^[5]、基于分环的多跳分簇路由算法(Ring Based Multi-hop Clustering Routing Algorithm, RBMC)协议^[6]、基于博弈论的能耗均衡非均匀分簇路由(Game theory based energy Balance Unequal Clustering routing, GBUC)算法^[7]等。其中比较典型的有李成法等^[8]提出的节能非均匀分簇(Energy-Efficient Uneven Clustering, EEUC)路由协议,该协议采用非均匀分簇方式,使距离基站较近的簇的规模相对较小,减少了簇内能耗以预留出更多的能量转发较远簇的数据。

分簇协议改善了无线传感器网络能量不均衡的状况,然而从系统整体能量消耗角度来看则是以浪费一些节点能量的代价换取节点间能量均衡。在图1所示的传感器网络中应用分簇协议,如图2所示,图中节点分为两个簇,簇头分别是CH1和CH2,对于图中的节点A,在EEUC等分簇协议下,它的数据发送方向为A-CH1-CH2-BS,要经过两次转发到达基站,显然,若考虑系统整体的能量消耗,A的数据

经 A-C-BS 的路径会最节省整体能量。同样,在分簇协议中,节点 B 划分入 CH2 簇,它的数据发送路径是 B-CH2-BS,然而 B 直接将数据发给 BS 会更节省整体能量。可见,分簇协议不可避免增加了数据从采集节点到基站经过的转发次数和总的转发距离,这造成了系统整体能量的浪费。

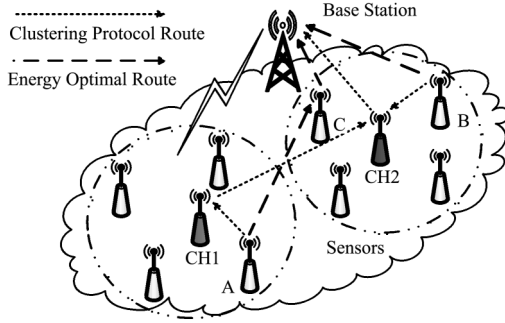


图2 无线传感器网络分簇协议路径

Fig.2 Route of clustering protocol in wireless sensor networks

由此看来,在无线传感器网络中,不能既使整体能量消耗最小又使所有节点能量均衡,所以不能最大限度延长系统生存时间。本文提出的电源线连接采集节点方案使得采集节点间能量可以相互传递,从而使能量均衡;节点数据传输选择使整体能量消耗最小的路径,以最大限度节省数据发送能量。

2 传感器系统能耗模型

2.1 数据传输能耗模型

我们采用与文献[2]相同的无线电能耗模型,该模型如图3所示。

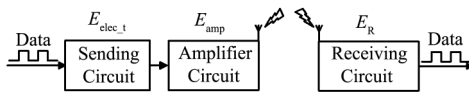


图3 无线电能耗模型

Fig.3 Radio energy consumption model

数据发送过程中的能耗由以下三部分组成:

1) 发送节点向相距 d 的节点发送 m bit 数据的能耗 $E_t(d, m)$ 由两部分组成,发送电路损耗 $E_{elec,t}$ 和功率放大损耗 E_{amp} 。

$$E_t(d, m) = E_{elec,t} + E_{amp} = \begin{cases} m \times E_{elec} + m \times \varepsilon_{fs} \times d^2, & (d < d_0) \\ m \times E_{elec} + m \times \varepsilon_{amp} \times d^4, & (d \geq d_0) \end{cases} \quad (1)$$

式中: E_{elec} 表示发射单位比特的数据能耗; ε_{fs} 代表自由空间模式下单位比特的数据能耗; ε_{amp} 表示多径衰减模式下单位比特的数据能耗; $d_0 = \sqrt{\varepsilon_{fs}/\varepsilon_{amp}}$ 是划

分空间模型的临界值。

2) 接收节点接收 m bit 数据的能耗为 $E_R(m)$ 。

$$E_R(m) = m \times E_{elec} \quad (2)$$

3) 数据中转节点融合 m bit 数据的能耗为 $E_{DA}(m)$ 。

$$E_{DA}(m) = m \times E_{da} \quad (3)$$

式中: E_{da} 为融合单位比特数据需要的能量。

2.2 电能转移能耗模型

电能在线路上转移产生热损耗,考虑 E 焦耳能量从 A 节点转移到 B 节点的情况。设电压为 u (V), 电流 i (A), 电线电阻 ρ ($\Omega \cdot m^{-1}$), 两点间距离 L (m)。如图4所示。

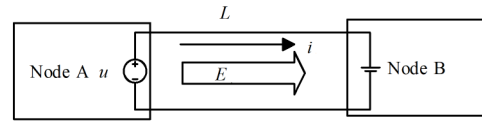


图4 能量转移示意图

Fig.4 Energy transfer model

能量转移功率 $P = u \times i$, 以恒定电流转移 E 焦耳能量用时为:

$$t = \frac{E}{P} = \frac{E}{u \times i} \quad (4)$$

电源线总电阻为:

$$R = 2L\rho \quad (5)$$

得出能量损失为:

$$E_{loss} = i^2 R t = \frac{2\rho i}{u} \times L \times E \quad (6)$$

可见,若以恒定电流和电压转移能量,线损和线长与转移能量的乘积成正比。

3 传感器数据采集系统的电源线连接方案设计

3.1 电源线连接方案

传感器节点位置确定后,可以找到一条总长度最短的路径连接所有节点。一个传感器网络可以看成一副联通加权无向图,节点可以看作加权无向图中的顶点,而任意两节点间的电源线可看作是连接两个顶点的一条边,其权值为电源线长度。可以找到此加权无向图的最小权重生成树 T,使得所有节点联通,且权值之和最小。按树 T 的拓扑结构连接各个节点之间的电源线就是最短的方案。图5描述了一个有 20 个节点的简单传感器数据采集系统,采集节点随机分布,根据两两之间的距离信息,以基站

为根构造最小生成树,实际的电源线连接方案在图中画出。

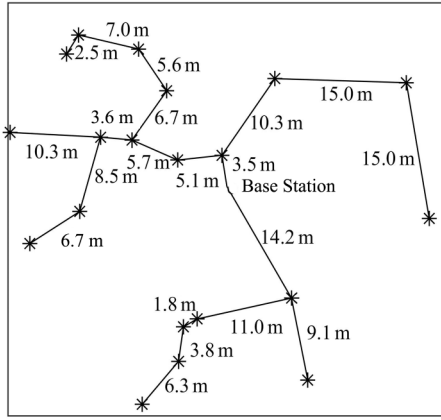


图5 电源线连接方案
Fig.5 Power line connection scheme

3.2 电能传输损耗估算

按§3.1中的方式连接电源线,在一个 N 个节点的系统中,共有 $N-1$ 段电源线,只要分别计算出各段电源线的长度及通过它传输的电能,根据式(6)即可计算出系统整体的电能传输损失。

图6表示了几个节点电源线连接的树状结构。考虑图中B、D两点间的电源线,它将所有节点分为两组:靠近树根的组 $G_1 = \{A, B, C, G, H, I\}$;远离树根的组 $G_2 = \{D, E, F\}$,经电源线传递的能量:

$$E_{BD} = \left| \sum (E_i - \bar{E}) \right| \quad i \in G_1$$

其中: $\bar{E}$ 是所有采集节点能量平均值。

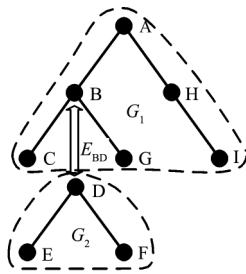


图6 最小生成树拓扑连接及能量转移
Fig.6 Minimum spanning tree topological connection and energy transfer

对于每个节点 N ,在最小生成树中都有唯一的前驱节点 N_{pre} ,两点间的电源线长记为 l_N ,它把所有节点分为两组 G_1 和 G_2 。 G_2 是以节点 N 为根的搜索树,记为 $T(N)$,这段线上传输能量:

$$E_N = \left| \sum (E_j - \bar{E}) \right| \quad j \in T(N)$$

根据式(6),这段电源线的损耗为:

$$E_{loss} = \frac{2\rho i}{u} \times l_N \times \left| \sum (E_j - \bar{E}) \right|, \quad j \in T(N) \quad (7)$$

系统整体损耗:

$$E_{loss} = \sum E_{loss}(j) \quad (8)$$

式(8)用来估算能量在电源线上传输造成的损耗。

电池供电的站体能量用电压表征,电压高则意味着能量多,高于平均电压的节点输出能量,低于平均电压的节点接收能量。在方案实施中,只需要给采集节点设置平均电压,若本地电池电压高于平均值,则向电源线输出本地电池能量,反之则优先使用电源线能量工作,并保存一部分能量到本地电池。

3.3 最优传输路径算法

无线传感器网络中有很多路由算法,如文献[9]利用蚁群算法,参考局部能量确定路由;文献[10]则综合考虑节点剩余能量和物理位置,这些路由协议都要选择能量充足的路径,限制路整体消耗达到最小,同时不可避免地增加了频繁确定路由表造成的协议消耗。

电源线连接的方案中,所有节点能量充分均衡,各个节点选择数据传输路径时可以充分考虑整体能量最优。距离基站较远的节点的数据要经过多跳传输发送给基站。对于给定的距离,跳数太少时,每一跳距离较远,能量消耗和距离的平方成正比,所以能耗会很大;跳数太多时,虽然每一跳距离近,能耗很小,但多个中转节点额外的接收、发送、融合数据的损耗会变多,因此,选择合适的跳数可以节省发送数据的能量。对于一个距离基站为 d ,经过距离相等的 n 跳传输的数据比特,它消耗的总能量为 $E_{bit}(d, n)$ 。

$$E_{bit}(d, n) = n \times E_T + (n - 1) \times (E_R + E_{DA})$$

$$= \begin{cases} n \times (E_{elec} + \varepsilon_{fs} \times \left(\frac{d}{n}\right)^2) + (n - 1) \times (E_{elec} + E_{da}), & \frac{d}{n} < d_0 \\ n \times (E_{elec} + \varepsilon_{amp} \times \left(\frac{d}{n}\right)^4) + (n - 1) \times (E_{elec} + E_{da}), & \frac{d}{n} \geq d_0 \end{cases} \quad (9)$$

我们总能找到合适的跳数使得 $E_{bit}(d, n)$ 最小,参考文献[1]中的参数,令:

$$\begin{cases} E_{elec} = 50 \\ \varepsilon_{fs} = 10 \\ \varepsilon_{amp} = 0.0013 \\ E_{da} = 5 \\ d_0 = 87 \end{cases}$$

图7(a)是在不同距离时,传输一个比特需要的最小能量,图中不同区间标示的数字是此区间距离内使得能量最小的最优跳数,显然,随距离增大,最优跳数逐渐增加。整体来看,经多跳传输的能耗和距离近似成线性关系。105 m以内的节点直接和基

站通信能量最小,此后大致每远离 d_0 就增加一跳,即一个节点向基站的通信路径上,下一跳的位置在距离 d_0 以内。图7(b)是单跳发送的能耗。对比单跳和多跳的能量消耗可见,随距离增大,增加跳数可以显著降低能量消耗。

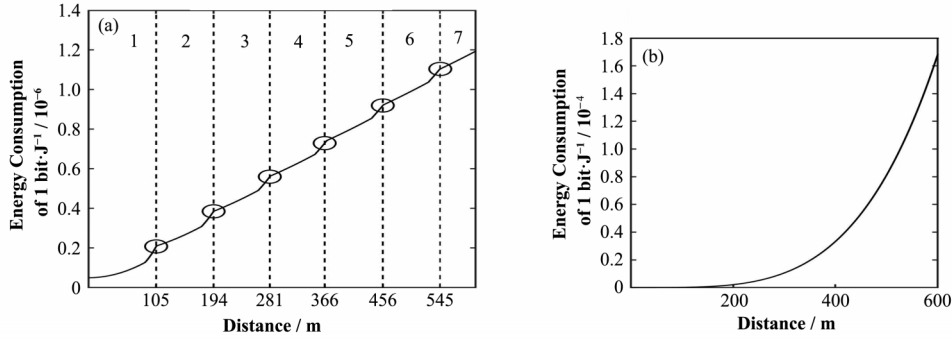


图7 不同距离,多跳最小能耗及跳数(a)和单跳能耗(b)

Fig.7 Minimum energy consumption and number of hops (a) and single hop energy consumption (b) for different distances

若基站可以汇集所有节点的位置信息,就可以得到各个节点到基站的距离,并根据图7确定最佳跳数以及每一跳的距离,从而确定其路由,基站再将路由信息广播发送给所有节点,此后的工作过程中不需要更新路由表。

4 仿真

为验证电源线连接的方案是否能有效提高系统寿命,用MATLAB对实验系统进行了仿真。在核物

理实验中,由于实验规模不同,实验场地大小也会不同,所以我们仿真不同场地大小的情况,并和分簇协议进行比较。系统工作过程仿真参照文献[2],所有采集节点采集并发送一个数据包的过程称为一个“轮”,完成一轮数据采集发送后计算各个节点能量消耗以及电能在节点间传递损耗的情况,然后继续下一轮。若节点能量耗尽就将其从系统中删除,各个节点采集数据的轮次就代表其生存时间。仿真用到的一些参数如表1所示。

表1 仿真参数
Table 1 Simulation parameters

参数 Parameter	数值 Value
节点初始能量 Initial energy / J	0.5
数据包长度 Packet length / bit	4 000
发送、接收电路能耗 Energy consumption of transmitting and receiving circuits / $\text{nJ} \cdot \text{bit}^{-1}$	50
$\epsilon_{\text{is}} / \text{pJ} \cdot \text{bit}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$	10
$\epsilon_{\text{amp}} / \text{pJ} \cdot \text{bit}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$	0.001 3
$E_{\text{da}} / \text{nJ} \cdot \text{bit}^{-1}$	5
能量转移电压(u) Energy transfer voltage (u) / V	5
能量转移电流(i) Energy transfer current (i) / mA	10
电源线电阻(ρ) Power line resistance (ρ) / $\Omega \cdot \text{m}^{-1}$	10

模拟该物理实验的规模,仿真了 $400 \text{ m} \times 400 \text{ m}$ 、 $600 \text{ m} \times 600 \text{ m}$ 面积,节点个数为 500、1 000 时的情况,并和EEUC协议比较。结果如图8所示,图中横坐标表示发送数据轮次,纵坐标为存活节点数目。可见,连接电源线的系统整体存活时间远长于分簇协议,且分簇协议较早就出现了死亡节点。比如 $400 \text{ m} \times 400 \text{ m}$, 500 个节点的情况(图8(a))。应用EEUC协议,大部分节点在150轮左右耗尽能量,然

而70轮时就已经有节点能量耗尽,在实际实验中就必须更换电池重新实验。而电源线连接的系统可以充分均衡节点间能量,所有节点都能工作530轮左右。

与图8(a)对应,图9(a)表示了每个轮次存活节点的平均能耗 E_{NODE} 为:

$$E_{\text{NODE}} = \frac{E_{\text{ROUND}}}{N_{\text{LIVE}}}$$

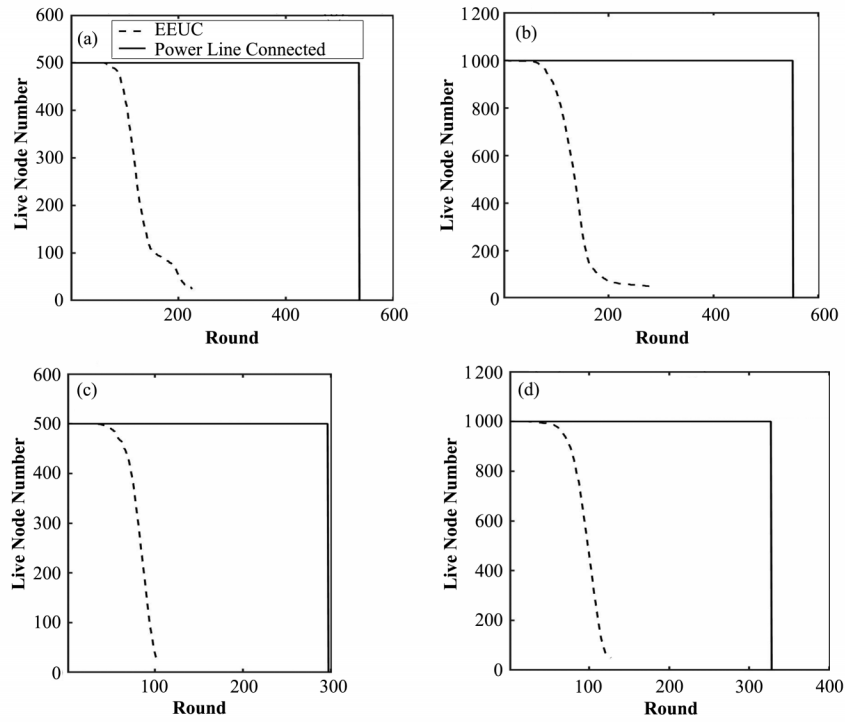


图8 仿真结果

(a) 400 m×400 m, 500 节点, (b) 400 m×400 m, 1 000 节点, (c) 600 m×600 m, 500 节点, (d) 600 m×600 m, 1 000 节点

Fig.8 Simulation result

(a) 400 m×400 m, 500 nodes, (b) 400 m×400 m, 1 000 nodes, (c) 600 m×600 m, 500 nodes, (d) 600 m×600 m, 1 000 nodes

式中: E_{ROUND} 为该轮次系统所有节点能耗之和; N_{LIVE} 为该轮次存活的节点数。电源线连接的系统整个工作过程没有节点提前死亡且通信路由不变, 每轮总能耗也不变, 仿真得到节点每轮平均能耗始终为 $9.1 \times 10^{-4} \text{ J}$; EEUC 协议下, 大部分节点可以存活 100 轮, 每轮平均能耗约为 $4.2 \times 10^{-3} \text{ J}$ 。由此可得, 电源线连接的方案可以使节点平均能耗降低约 78%。根据系统消耗总能量和发送数据包总数, 可以计算出发送单位数据包消耗的能量 E_{PACKET} :

$$E_{\text{PACKET}} = \frac{E_{\text{TOTAL}}}{N_{\text{PACKET}}}$$

式中: E_{TOTAL} 为从开始工作到当前轮次时间内系统中所有节点消耗的能量之和; N_{PACKET} 为系统总共传输的数据包数量。图 9(b) 表示电源线连接方案和 EEUC 单位数据包消耗能量的比值, EEUC 方案节点全部死亡时, 能耗比值接近 4.3:1, 即电源线连接的方案能以更小的能耗传输数据。

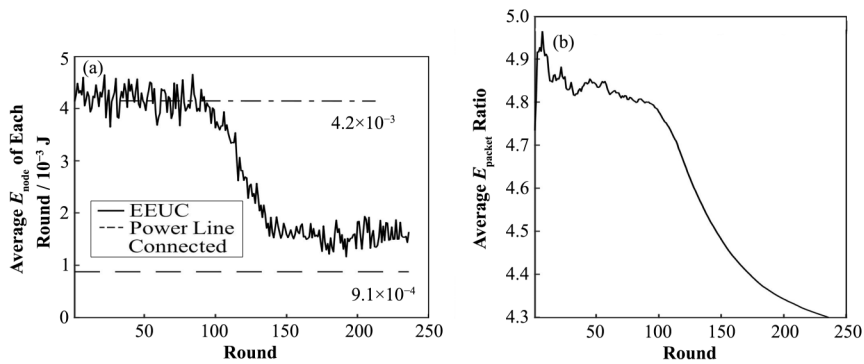


图9 节点能耗和单位数据包能耗 (a) 各个轮次平均节点能耗, (b) 单位数据包的平均能耗比值随轮次变化曲线

Fig.9 Node energy consumption and packet energy consumption

(a) Node average energy consumption for each round, (b) Packet average energy consumption ratio

综合图8和图9的仿真情况,采用电源线连接的系统,平均发送功耗降低78%,生存时间整体可以提高约5倍。

5 分析和总结

无线系统常用的分簇算法一定程度上使网络能量均衡,延长了工作寿命,但簇内通信、簇头间数据转发不能采用整体能量最优路径,使得系统整体的能量浪费比较多。本文提出的用电源线连接采集节点的方法使能量充分均衡,所有节点可以用能量最优路径传输数据,节省整体能量,使得系统寿命显著增加。

虽然系统中增加了电源线连接,但不用更改传感器节点整体设计,在满足实验要求的同时最大程度降低了改造难度。而增设的电源线只是连通节点间的直流电源,并不需要具备通信能力,成本低,部署相对容易。而且在该核物理实验中,节点布置完成后要进行很多次实验,在很长时间内都不会更改采集节点部署位置,所以电源线铺设一次就能够使用很久。

由仿真结果可以看出,采用电源线连接传感器节点的电源改造方案使该核物理实验传感器数据采集系统的工作时间延长5倍左右。该方法在不同规模的无线系统中都能有效提高工作时间,或许可以为其他一些类似的数据采集和传输系统提供借鉴。

参考文献

- 付海龙, 贾铭椿, 彭桂初. 基于无线传感器网络的核电站环境辐射连续监测系统研究[J]. 核电子学与探测技术, 2010, **30**(6): 839–842. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2010.06.029.
- FU Hailong, JIA Mingchun, PENG Guichu. Research on continuous environmental radiation monitoring system for NPP based on wireless sensor network[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2010, **30**(6): 839 – 842. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2010.06.029.
- Wendi Rabiner Heinzelman, Anantha Chandrakasan, Hari Balakrishnan. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks[C]. Proceedings of Hawaii International Conference on System Sciences, 2000, **2**: 1–10. DOI: 10.1109/HICSS.2000.926982.
- Ossama Younis, Sonia Fahmy. HEED: a hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for ad-hoc sensor networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2004, **3**(4): 379 – 399. DOI: 10.1109/TMC.2004.41.
- Chamam A, Pierre S. A distributed energy-efficient clustering protocol for wireless sensor networks[J]. Computers and Electrical Engineering, 2010, **36**(2): 303–312. DOI: 10.1109/ISSNIP.2011.6146592.
- Barati H, Movaghar A, Rahmani A M. EACHP: energy aware clustering hierarchy protocol for large scale wireless sensor networks[J]. Wireless Personal Communications, 2015, **85**(3): 765 – 789. DOI: 10.1007/s11277-015-2807-2.
- 刘志, 裘正定. 基于分环多跳的无线传感网络分簇路由算法[J]. 通信学报, 2008, **29**(3): 104–113. DOI: 10.3321/j.issn:1000-436X.2008.03.017.
- LIU Zhi, QIU Zhengding. Ring based multi-hop clustering routing algorithm for wireless sensor networks[J]. Journal on Communications, 2008, **29**(3): 104–113. DOI: 10.3321/j.issn:1000-436X.2008.03.017.
- 孙庆中, 余强, 宋伟. 基于博弈论能耗均衡的WSN非均匀分簇路由协议[J]. 计算机应用, 2014, **34**(11): 3164–3169. DOI: 10.11772/j.issn.1001-9081.2014.11.3164.
- SUN Qingzhong, YU Qiang, SONG Wei. Energy-balanced unequal clustering routing protocol based on game theory for wireless sensor network[J]. Journal of Computer Applications, 2014, **34**(11): 3164–3169. DOI: 10.11772/j.issn.1001-9081.2014.11.3164.
- 李成法, 陈贵海. 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, 2008, **30**(1): 27–36. DOI: 10.3321/j.issn:0254-4164.2007.01.004.
- LI Chengfa, CHEN Guihai. Energy-balanced unequal clustering routing protocol for wireless sensor networks[J]. Chinese Journal of Computers, 2008, **30**(1): 27–36. DOI: 10.3321/j.issn:0254-4164.2007.01.004.
- 苏圣超, 赵曙光. 基于能耗均衡的无线传感器路由算法[J]. 计算机学报, 2018, **45**(10): 111 – 114. DOI: 10.11896/j.issn:1002-137X.2018.10.021.
- SU Shengchao, ZHAO Shuguang. Wireless sensor routing algorithm based on energy balance[J]. Chinese Journal of Computers, 2018, **45**(10): 111–114. DOI: 10.11896/j.issn:1002-137X.2018.10.021.
- 李莉, 李雪梅, 李秀滢. 改进的无线传感器网络路由算法[J]. 传感器与微系统, 2019, **38**(2): 150–153. DOI: 10.13873/j.issn:1000-9787.2019.02.0150.04.
- LI Li, LI Xuemei, LI Xiuying. Improved routing algorithm for WSNs[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2019, **38**(2): 150 – 153. DOI: 10.13873/j.issn:1000-9787.2019.02.0150.04.