

最大化最小能耗概率的移动 Sink 无线 传感器网络数据收集方法

徐 佳^{1,2}, 冯 鑫¹, 杨富贵³, 王传平¹, 王汝传¹

(1. 南京邮电大学计算机学院, 江苏南京 210003; 2. 南京理工大学连云港研究院, 江苏连云港 222006;
3. 上海锦湖日丽塑料有限公司, 上海 201100)

摘 要: 在基于移动 sink 传感器网络中, 传感器节点能量受限, 数据收集的能耗问题一直是研究的热点. 通过建立最大化最小能耗概率模型, 提出一种最大化最小能耗概率 (Maximizing Minimum Probability of Energy Consumption, MMPEC) 数据收集方法. MMPEC 对网络中子节点与汇聚节点之间的路径长度进行分布式优化, 使得整个网络的能耗达到最低的概率最大化. 仿真结果表明, MMPEC 在能耗方面优于同类基于移动 sink 的 WSN 分层数据收集方法.

关键词: 传感器网络; 移动 sink; 数据收集; 能量消耗

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2015)12-2470-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2015.12.019

A Data Collection Method by Maximizing Minimum Probability of Energy Consumption for Mobile Sink Based WSNs

XU Jia^{1,2}, FENG Xin¹, YANG Fu-gui³, WANG Chuan-ping¹, WANG Ru-chuan¹

(1. Department of Computer, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu 210003, China;

2. Lianyungang Institute of Nanjing University of Science and Technology, Lianyungang, Jiangsu 222006, China;

3. Shanghai Kumho-Sunny Plastics Co., Ltd, Shanghai 201100, China)

Abstract: In the mobile sink based sensor networks, the energy consumption issue becomes the key point because of energy constraint on sensor nodes. We established a maximizing minimum probability of energy consumption model, and gave a strong mathematical proof. We also proposed a maximizing minimum probability of energy consumption (MMPEC) data collection algorithm based on this model. MMPEC optimize the length of path distributed between child nodes and the aggregation nodes, and achieves low energy consumption of the whole network. The simulation results show that MMPEC is far superior to other hierarchical data collection methods based on a mobile sink in energy consumption.

Key words: sensor network; mobile sink; data collection; energy consumption

1 引言

在无线传感器网络 (Wireless Sensor Networks, WSNs) 中, 能耗一直以来都是热点问题. 在无线传感器网络中大部分节点之间需要多跳才能到达, 如何减少节点之间的跳数成为延长全网生存周期的关键问题. 在传统的静态网络中, 汇聚节点固定, 所有节点的数据都集中到汇聚节点中, 使得汇聚节点及其周围节点需要承担较大的数据转发量, 容易因能量耗尽死亡. 在这种静态拓扑结构的网络中, 能耗问题一直难以解决.

近年来, 人们提出了基于移动 sink 的数据收集方

案, 使用一个或多个移动 sink 节点在一定的路径上移动, 从而减少了静态节点的能量消耗, 使得能量消耗在全网更加平均, 以达到减少网络能耗、延长网络生存周期的目的. 而由移动 sink 节点轮询每个节点的平面收集方法, 虽然使每个节点与移动 sink 节点之间只有一跳的距离, 传感器节点的能耗损耗最小, 但是数据收集的时延也最大, 若大规模部署传感器节点, 数据的收集工作效率较低, 不适合大规模使用. 一种可行的解决方法是容忍一定的延时, 来弥补能量上的消耗, 平衡数据收集的能量消耗和时延. 由此引出了一种新的数据收集方法, 与静态传感器网络不同, 该方法需要将整个网络划

收稿日期: 2014-07-20; 修回日期: 2014-09-04; 责任编辑: 梅志强

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 61100199, No. 61472193); 江苏省科技支撑计划 (No. BE2013666); 江苏省自然科学基金面上项目 (No. BK20141429); 江苏省高校自然科学研究重大项目 (No. 12KJA520002); 连云港市科技项目 (No. SH1306); 江苏省普通高校研究生科研创新计划 (No. CXLI13_470)

分成若干个路由树或簇,簇首或树根为汇聚节点,其余节点将数据转发至其汇聚节点,移动 sink 节点轮询每个汇聚节点,最终获取整个网络的数据。

基于上述思想,本文首先建立了最大化最小能耗概率模型,在此基础上提出了一种最大化最小能耗概率的数据收集算法 MMPEC. 仿真结果表明在数据收集时延与其他分层数据收集协议相当的情况下,MMPEC 能将网络的能量消耗降到较低水平,有效延长了整个网络的生存周期。

2 相关工作

近年来越来越多的学者开始研究基于分层拓扑的移动 sink 数据收集方法. 较早提出的分簇算法是 LEACH^[1-3](Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy),它是层簇数据收集协议的先驱,它从逻辑上将传感器网络划分为多个簇,并采用循环随机轮流的方式选举簇首,每个簇的成员节点将其数据发送到簇首节点. LEACH 的核心思想是通过随机选择簇首,从而将整个网络的能量负载平均地分配到每个传感器节点上,达到降低网络能源消耗的目的,但簇首的选取有时难以达到理想的效果,并没有很好的解决能量消耗问题. PEGASIS^[4](Power-Efficient GATHERing in Sensor Information Systems)是 LEACH 的改进算法,为了减少网络的能量消耗,节点仅和最近的邻居之间进行通信. 与 LEACH 不同的是,PEGASIS 算法采用链式结构,采集到的数据以点对点的方式传递并最终传递到汇聚节点,由汇聚节点发送至移动 sink 节点. 由于链式的传递路径较长,使得数据传输开销较大. 在 LEACH 协议之上,文献[5]提出了一种应用于特定环境的 TEEN(Threshold Sensitive Energy Efficient sensor Network protocol)协议. 其后,文献[6]对 TEEN 进行改进,提出了 APTEEN(the Adaptive Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network protocol)协议. TEEN 和 APTEEN 协议的缺点是阈值设定较为复杂,维护网络层簇结构能耗较大. RT-VT 算法^[7]基于 MST(Minimum Spanning Tree)和 SMT(Steiner Minimum Tree)设计最优路径,以解决节点到其汇聚节点的路径问题,有效的平衡了数据延迟和能量消耗. 但是 MST 和 SMT 构建算法复杂. 文献[8]针对基于移动 sink 的密集传感网络,提出了一种使用遗传算法的数据收集算法,用于解决系统能耗优化的问题. 由于使用智能算法进行计算,构建的网络拓扑使得数据收集的总能量消耗较低,但是构建拓扑需要将大量信息集中后使用集中式的遗传算法进行优化,不适合在分布式的传感器网络中使用. 为平衡能量消耗与数据收集时延,文献[9]提出一种基于传输距离约束的移动数据收集方法,以移动 sink 的路径长度最小化为目标,建立整数线性规划模型并通

过启发式算法求解. 文献[10]使用移动 MULE 收集传感器节点采集的数据,提出了各子网中传感器节点的分布式存储管理策略 DSMS(Distributed Storage Management Strategy),其目标是:(1)最小化缓存丢包;(2)低优先级数据包首先被丢弃;(3)高优先级数据包存储在接近 Sink 节点的位置. DSMS 可以从系统层次对缓存管理进行整体优化,有助于提高数据发送率和重要数据传输的可靠性,但为了维护优先级层次关系,需要进行额外的数据包交换,无疑增加了能量消耗. 文献[11]为了改进传统移动 Sink 数据收集中节点需要周期性广播自身信息(包括地理位置、能量水平等)的缺点,提出了基于随机压缩的移动 Sink 数据收集方案. 网络中的一部分节点通过概率成为采集者(Collector),网络中其他节点将通过随机定向传输(Stochastic direct transmission)将自己的数据发送给通信范围内的采集者,当采集者接收到一定数量的数据后,将这些数据利用 Bloom filter 技术进行压缩,再采用角度传输(Angle transmission)以多跳形式传送数据给移动 Sink. 文献[12,13]提出了移动普适网络扩展 MULE(Mobile Ubiquitous LAN Extensions)方法,其专注于大范围内的数据收集. 仅使用短距离通信的 MULE 系统往返于普通传感器节点,相对于使用大功率基础设施的方案和部署大规模密集传感器网络的方案来说是,成本低廉,并且能够有效的节省传感器节点的能耗,但也存在一些问题有待进一步研究,如多 MULE 之间的通信及其通信的可靠性. 文献[14]通过设置缓冲区研究如何在数据收集过程中使得整个网络的数据收集能量开销更加均衡的分摊到每个节点上。

3 网络模型和问题描述

3.1 网络模型

假设 N 个传感器节点分布在大小为 $M \times M$ 的范围内,移动 sink 节点 S 沿着一定的固定轨迹移动. 由于传感器节点通信范围有限,所以大部分节点需要多跳才能与移动 sink 节点通信. 为此,我们将直接发送数据到移动 sink 节点的节点称为汇聚节点,其余节点称为子节点,子节点将消息传递到相应的汇聚节点,由汇聚节点转发给移动 sink 节点,网络场景如图 1 所示。

为简化模型,本文对该网络模型做出如下假设:

假设 1 节点密集分布在网络中,所有节点都可通过单跳或多跳与其他节点通信;

假设 2 节点具有相同的配置,并处于静止状态;

假设 3 移动 sink 移动速度远低于数据传播速度;

假设 4 移动 sink 具备足够的计算能力、能量和存储容量;

假设 5 每个子节点只能选择一个汇聚节点;

假设 6 节点可获得自身位置信息。

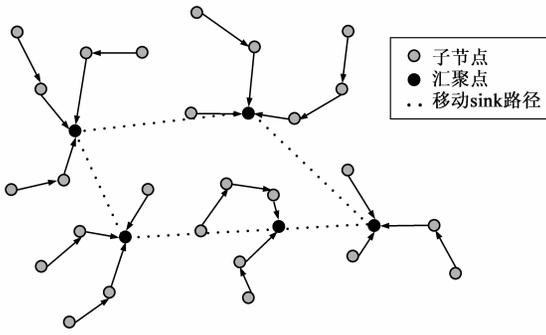


图1 基于移动Sink的无线传感器网络应用场景

3.2 问题描述

在实际的收集过程中,子节点将消息转发给相对应的汇聚节点,当移动 sink 节点接近此汇聚节点时将此消息转发给移动 sink 节点.本文采用文献[6]中的能耗模型:

$$p \approx e(k_r + k_i) \quad (1)$$

节点总能耗 p 由接收数据总量 k_r 和发送数据总量 k_i 共同决定. e 为常数,表示收发单位比特数据所需要的能耗.

在移动 sink 单个运行周期内,任何节点 i 接收数据量 k_r^i 和发送数据量 k_i^i 之间的关系为 $k_i^i = k_r^i + q$, q 表示任意节点 i 在单个运行周期所采集的数据总量,并假设所有节点单个运行周期内采集的数据总量 q 相等.根据假设3,所有子节点向其所属汇聚节点发送数据,故可得到全网所有节点接收数据总量和跳数直接的关系,见式(2):

$$\sum_{i=1}^n k_r^i = \sum_{i=1}^n h_i \cdot q \quad (2)$$

式(2)中, h_i 表示子节点 i 到其所属汇聚节点的跳数.如果节点 i 为汇聚节点,则 h_i 为 0. 根据式(2),可将单轮系统总能耗 p_{total} 表述为最小跳数和的形式,如

$$\begin{aligned} p_{\text{total}} &= \sum_{i=1}^n p_i = \sum_{i=1}^n e(k_r^i + k_i^i) \\ &= \sum_{i=1}^n e(2k_r^i + q) = \sum_{i=1}^n e(2h_i + 1) \cdot q \end{aligned} \quad (3)$$

式(3)中, p_i 为任意节点 i 的单轮总能耗,根据式(3),网络能耗最小化问题等价于全网子节点距离其汇聚节点跳数和最小化问题.

以上部分对能耗最小化作了分析,在此给出该最优化问题的数学描述:

目标函数:

$$\min \sum_{i=1}^n l_i \quad (4)$$

约束条件:

$$\sum_{i=1}^n s_i = N \quad (5)$$

目标函数式(4)中, l_i 为子节点 i 到其所属汇聚节点 k 的距离,在约束条件式(5)中, s_i 代表子节点 i , N 为整个网络的子节点总数.

4 最大化最小能耗概率模型

设子节点到其所属汇聚节点的路径长度 $l_1, l_2, l_3, \dots, l_n$ 为随机变量服从泊松分布,期望为 μ , 标准差为 σ , 并且相互独立同分布,存在数学期望和方差,且所有子节点到其汇聚节点的和,即总路径 $\sum_{i=1}^n l_i$ 近似服从正态分布, L_{max} 为最优总路径长度,则 $\sum_{i=1}^n l_i$ 大于 L_{max} 的概率可由列维-林德伯格中心极限定理得出:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P \left\{ \frac{1}{\sigma \sqrt{n}} \left(\sum_{i=1}^n l_i - n\mu \right) \leq l \right\} = \Phi(l) \quad (6)$$

$$\begin{aligned} L_{\text{sum}} &= \sum_{i=1}^n l_i \\ E(L_{\text{sum}}) &= n \times \mu \end{aligned} \quad (7)$$

$$D(L_{\text{sum}}) = n \times \sigma^2$$

在公式(6)中, l 为任意实数,在公式(7)中, L_{sum} 为所有子节点到其汇聚节点的和, $E(L_{\text{sum}})$ 为样本期望, $D(L_{\text{sum}})$ 为样本方差.

应用列维-林德伯格中心极限定理:

$$\begin{aligned} P \{ L_{\text{sum}} > L_{\text{max}} \} &= 1 - P \{ L_n \leq L_{\text{max}} \} \\ &= 1 - P \left\{ \frac{L_n - n \times \mu}{\sqrt{n \times \sigma^2}} \leq \frac{L_{\text{max}} - n \times \mu}{\sqrt{n \times \sigma^2}} \right\} \\ &= 1 - \Phi \left(\frac{L_{\text{max}} - n \times \mu}{\sqrt{n \times \sigma^2}} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

当 $P \{ L_{\text{sum}} > L_{\text{max}} \}$ 较小时,说明 L_{sum} 小于 L_{max} 的概率较大,即存在更小的 L_{max} 的概率较大,此时的 L_{max} 的长度达到最优的概率较小;当 $P \{ L_{\text{sum}} > L_{\text{max}} \}$ 较大时,存在比 L_{max} 更小的总路径长度的概率已经很小,此时的 L_{max} 的长度达到最优的概率较大.

当 $\Phi \left(\frac{L_{\text{max}} - n \times \mu}{\sqrt{n \times \sigma^2}} \right)$ 最小时, $P \{ L_{\text{sum}} > L_{\text{max}} \}$ 概率最大,此时总路径长度 $L_{\text{max}} = 0$,即网络中每个节点均成为汇聚节点.为增强析协议的可扩展性,平衡时延与能耗,本文取 $\frac{L_{\text{max}} - n \times \mu}{\sqrt{n \times \sigma^2}} = 0$,此时 $P \{ L_{\text{sum}} > L_{\text{max}} \} = 0.5$.

当 $L_{\text{max}} = n \times \mu$ 时概率取最大值,整个网络的总路径长度取到最小值的概率大于 0.5. 而 μ 为随机变量的均值,即平均路径长度 \bar{l} ,其计算公式如下:

$$\bar{l} = \frac{\sum_{i=1}^n l_i}{n} \quad (9)$$

其中, l_i 为子节点 i 到其所属汇聚节点的路径长度, n 为子节点的数量.

由于移动 sink 的初始移动轨迹是随机的, 所以每次生成的路由树的形态都不同, 单棵树的总路径长度每次也不同, 路由森林的总路径长度也就不同. 为求路径长度的平均值, 我们进行多次试验, 计算每次的平均路径长度, 在多次的平均路径长度中在取一次平均, 记为二次平均路径长度 \bar{L} .

5 最大化最小能耗概率数据收集方法

当子节点到汇聚节点的路径总体上都趋近于二次平均路径长度 \bar{L} 时, 可以使整个网络的总路径达到最小值的概率最大. 根据这个理论, 我们建立一个所有子节点到其相应的汇聚节点的路径长度都趋近于 \bar{L} 的路由森林. 移动 sink 节点在网络中随机选择一点作为路径起点, 并发送广播, 在移动 sink 节点的通信半径范围内的节点收到消息后设为汇聚节点, 汇聚节点继续广播消息, 在汇聚节点通信半径范围内的节点收到消息后成为该汇聚节点的子节点, 子节点继续广播消息, 附近的子节点收到消息后成为广播消息的子节点的后继, 以此建立多棵路由树, 步骤如下:

第 1 轮 路由树建立

说明: 在该算法中, $MSG(id, type, level)$ 为消息格式, 用类型 1 代表汇聚节点, 类型 0 代表子节点, 所以 $MSG(5, 1, 1)$ 代表 5 号节点类型为汇聚节点并且该节点处于路由处的第 1 层, 即根节点.

步骤 1 sink 节点广播消息 $MSG(-1, 1, 0)$, 接收到的节点为汇聚节点, 并将自己的类型设为 1 并设为第 1 层, 代表汇聚节点.

步骤 2 汇聚节点广播消息 $MSG(id, 0, 1)$, 接收到的节点成为该汇聚节点的子节点, 将自己的类型设为 0, 记录上一跳节点 id , 子节点将汇聚节点的层数加 1 作为自己在路由树中的层次.

步骤 3 子节点 i 继续广播消息 $MSG(id, 0, level)$, 接到该消息的节点将自己的类型设为 0, 记录上一跳节点 id , 作为并子节点 i 的后继, 并在子节点 i 的层数基础上加 1 作为自己在路由树中的层次.

步骤 4 重复步骤 3, 直到没有节点落单, 整个网络形成若干个初始路由树.

步骤 5 深度遍历整个路由森林, 获得每棵路由树的子节点数, 并记录其所有子节点的层数, 计算每棵路由树的平均路径长度, 得到路由森林的平均路径.

每个子节点只能属于一颗路由树, 子节点加入某一路由树后便忽略其他消息. 步骤 1~5 执行 n 次, 执行次数越多, 获取的路由森林的二次平均路径长度 \bar{L} 就越准确, 一般取 100 次即可. 具体算法如图 2 所示:

```
While(TRUE)
{
    ReceiveMessage();
    if (MessageType == MSG(-1, 1, 0))
    {
        node.type = 1;
        node.level = 1;
    }
    elseif (MessageType == MSG(id, 0, level))
    {
        node.type = 0;
        node.father = id;
        node.level = level;
    }
    BroadcastMessage(MSG(node.id, node.type, node.level));
}
```

图 2 路由树建立算法

第 2 轮 路由树调整

移动 sink 节点随机选择初始起点, 按照第一轮方法建立路由森林. 由于移动 sink 节点初始起点的随机选取, 初始路由森林可能存在分布不均匀情况, 所以需要每对每棵路由树进行调整. 为使整个网络的消耗更为平均. 深度遍历整个路由森林, 在具体调整某棵路由树时, 深度遍历这棵路由树, 如果子节点 i 的路径长度大于 \bar{L} 的 α 倍, 就需要作出调整, 将路由树从子节点 i 处断开, 子节点 i 从子节点变为汇聚节点 i , 子节点 i 的后继节点以子节点 i 作为其新的汇聚节点, 树中其余节点保持不变. 以此类推, 对每个子节点都做相同处理, 当整个路由森林遍历完成之后, 所有节点距离其相应的汇聚节点的路径长度都不会超过 \bar{L} 的 α 倍. 最后使用旅行商算法计算移动 sink 节点访问各汇聚节点的最佳路径. 因此, 参数 α 的选取非常重要, 选取合适 α 的才能使总路径长度达到最优, 本文通过多次试验的方法获得较优的 α . 路由树调整算法如图 3 所示:

```
While (TRUE)
{
    while (root, ! isLeafnode, num)
    {
        if (node.level >  $\alpha \bar{L}$  && node.type = 0)
        {
            node.level = node.level-floor;
            num = node.level + 1;
            node.type = 1;
        }
        else
        {
            While (node, ! isLeafnode, num);
        }
    }
}
```

图 3 路由树调整算法

6 仿真

本节在 Matlab 平台上模拟实现了 MMPEC、RT-VT、MSDG^[15]、LEACH 算法,并进行主要性能比较。

研究能量消耗对网络性能的影响. 场景设置为 $300\text{m} \times 300\text{m}$, 其中均匀分布 $100 \sim 1000$ 个节点. 节点的通信半径是 10m , 初始能量设为 20000 , 收发单位比特数据所需要的能耗 e 设为 1 . 实验结果均为 100 次独立实验结果的平均值。

图 4 表明 MMPEC 的移动 sink 的移动路径长度明显优于平面收集算法. 平面路由由协议不存在汇聚节点, 有 n 个节点移动 sink 节点需访问 n 次节点, 所以移动 sink 的移动路径长度可直接使用 TSP (Traveling Salesman Problem) 算法得出. 由于移动 sink 节点轮询每个节点, 每个节点与移动 sink 节点之间只有一跳的距离, 即不存在热点问题, 每个传感器节点的能量消耗相当, 传感器节点的能耗损耗最小. 但是从图 4 可以看出与 MMPEC 相比, 平面路由算法的移动 sink 移动路径远远大于 MMPEC, 这将使得数据收集的时延较大. 若大规模部署传感器节点, 时延将远超实际能承受的时延范围. 故在以下讨论中, 我们主要对不同的分层数据收集类算法做详细的性能比较。

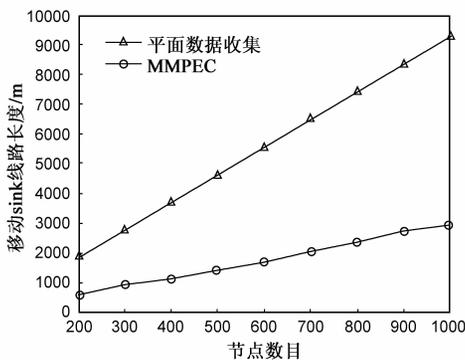


图4 sink移动路径长度对比

不同对网络生存周期的影响. 在不同 α 值的情况下各运行 3000 轮, 存活节点数如图 5 所示, 当 α 取 1 时, 虽然存活节点数量较多, 但是由于产生的汇聚点较多, 增加了数据收集时延, 同时不利于协议扩展. 当 α 取 1.5 时, 网络中子节点其到汇聚节点路径长度小于二次平均路径长度的路径与子节点到其汇聚节点的距离小于 1.5 倍 α 的路径可相互补充, 使得网络的平均距离更加趋于二次平均路径长度, 试验结果表明 3000 轮后仍有超过 200 个节点存活, 存活数量最多. 而当 α 大于等于 3.5 时, 3000 轮过后节点全部死亡. 根据以上试验, 我们将 α 的值设为 1.5 , 并在此情况下继续讨论 MMPEC 的性能。

图 6 表明, 在存在可接受的数据收集时延的情况下, MMPEC 算法构造的路由森林表现出较短的总路径长度. 而 LEACH 的簇首是随机选取的, 以期望削弱的“热点”问题的影响, 但无法优化簇内节点到簇首的路径长度. MSDG 将分簇和树形拓扑结合, 将距离移动 sink 最近的节点作为根节点动态构建路由数, 该算法适合分布式网络, 但仍没有考虑到子节点到汇聚节点的路径优化问题, 从而网络的数据收集总路径长度较大. RT-VT 基于 MST 和 SMT 设计路径, 使得所有子节点到其汇聚节点的总路径较优, 仅次于 MMPEC. 然而 MST 和 SMT 构建算法复杂, 而传感器节点的计算资源以及能耗有限, 后期网络维护代价较大。

本文对比了在部署 1000 个节点网络环境下, 经过多轮运行各算法后的死亡节点数. 图 7 表明当网络运行轮数较少时, MMPEC、LEACH、MSDG、RT-VT 算法均有着较低的死亡节点数, 但是随着运行轮数的增加, MMPEC 开始显示出较大的优势, 由于每个子节点到其汇聚节点的路径长度较小, 使得汇聚节点的能耗负担较轻, 从而延长汇聚节点的存活时间. MMPEC 在 2700 轮的时候死亡节点增加到 700 个, 整个网络的生命周期已经接近尾声, 需要更换传感器节点, 比 DT-VT、MSDG、LEACH 分别可多运行 300 轮、 698 轮、 932 轮, 极大的减少了网络的能耗, 有效的延长的网络的生命周期。

图 5 表明在部署 1000 个节点网络环境下, α 值的

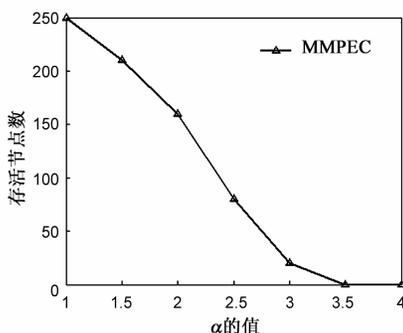


图5 α 值对网络生命周期的影响

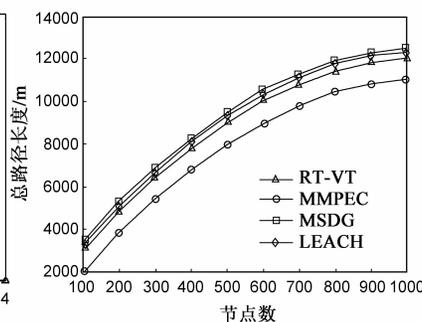


图6 子节点到其汇聚节点的总路径

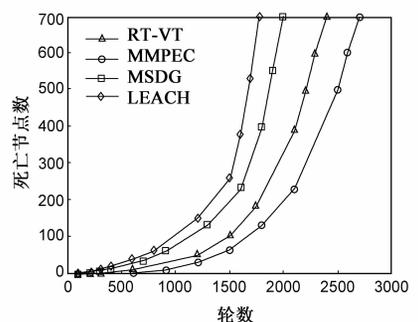


图7 多轮后死亡节点数

7 结束语

本文针对基于移动 sink 的无线传感器网络提出了一种最大化最小能耗概率的数据收集方法 MMPEC, 通过优化子节点到其相应移动 sink 节点的路径长度来降低全网数据收集能耗, 并从理论上证明了该方法的有效性. 仿真实验结果表明与同类协议相比, MMPEC 能够有效的减少整个网络数据收集的能量消耗, 延长了网络的生命周期.

本文提出了最大化最小能耗概率数据收集的理论和方法, 但在复杂的无线传感器网络应用中, 可能面临 Sink 路径长度受限、保证子树中节点最小数量、控制子树数量等诸多限制条件, 这也是今后进一步研究的方向.

参考文献

- [1] Wendi R H, Anantha C, Hari B. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks[A]. Proceedings of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences[C]. The Island of Maui; IEEE CS, 2000. 1 - 10.
- [2] 唐勇, 周明天, 张欣. 无线传感器网络路由协议研究发展[J]. 软件学报, 2006, 17(3): 410 - 421.
TANG Yong, ZHOU MingTian, ZHANG Xin. Overview of routing protocols in wireless sensor networks[J]. Journal of Software, 2006, 17(3): 410 - 421. (in Chinese)
- [3] 吕涛, 朱清新, 张路桥. 一种基于 LEACH 协议的改进算法[J]. 电子学报, 2011, 39(6): 1405 - 1409.
Lü Tao, ZHU Qing xin, ZHANG Lu qiao. An improved IEACH algorithm in wireless sensor network[J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(6): 1405 - 1409. (in Chinese)
- [4] Lindsey S, Raghavendra C S. PEGASIS: Power-efficient gathering in sensor information systems[A]. Proceedings of the IEEE Aerospace Conference[C]. Big Sky, MT, United States; IEEE CS, 2000. 1 - 6.
- [5] A Manjeshwar, D P Agrawal. TEEN: A routing protocol for enhanced efficiency in wireless sensor networks[A]. Proceedings of the 15th International Parallel and Distributed Processing Symposium[C]. San Francisco; IEEE CS, 2001. 2009 - 2015.
- [6] 江贺, 等. 无线传感器网络路由协议研究进展[J]. 小型微型计算机系统, 2007, 28(4): 594 - 598.
JIANG He, et al. Evolution of research of wireless sensor network routing protocols[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2007, 28(4): 594 - 598. (in Chinese)
- [7] Xing Guoliang, Wang Tian, Jia Weijia, Li Minming. Rendezvous design algorithms for wireless sensor networks with a mobile base station[A]. Proceedings of the International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing(MobiHoc)[C]. Hong Kong; ACM SIGMobile. 2008. 231 - 239.
- [8] 郜帅, 张宏科, 徐怀松. Sink 轨迹固定传感器网络的高效

数据采集机制[J]. 软件学报, 2010, 21(1): 147 - 162

GAO Shuai, ZHANG Hong Ke, XU Huai-Song. Efficient data gathering approach in sensor networks with path-Fixed sinks [J]. Journal of Software, 2010, 21(1): 147 - 162. (in Chinese)

- [9] M Zhao, Y Yang. Bounded relay hop mobile data gathering in wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Computers, 2012, 61(2): 265 - 277.
- [10] Tseng, Yu Chee, Lai Wan Ting, Huang Chi Fu, Wu Fang Jing. Using mobile mules for collecting data from an isolated wireless sensor network[A]. 39th International Conference on Parallel Processing, ICPP[C]. San Diego, CA, United States; IACC, 2010. 673 - 679.
- [11] Guo Longjiang, R aheemBeyah, Li Yingshu. SMITE: A stochastic compressive data collection protocol for mobile wireless sensor networks [A]. IEEE 30th Conference on Computer Communications(INFOCOM)[C]. Shanghai, China; IEEE, 2010. 1611 - 1619.
- [12] R Shah, S Roy, S Jain, W Brunette. Data MULEs: Modeling a three-tier architecture for sparse sensor networks[J]. Ad Hoc Networks, 2003, 1(2 - 3): 215 - 233.
- [13] S Jain, R Shah, W Brunette, G Borriello, S Roy. Exploiting mobility for energy efficient data collection in wireless sensor networks[J]. Mobile Networks and Applications Journal, 2006, 11(3): 327 - 339.
- [14] 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
SHI Gao Tao, LIAO Ming hong. Movemen-assisted data gathering scheme with load-balancing for sensor networks [J]. Journal of Software, 2007, 18(9): 2235 - 2244. (in Chinese)
- [15] 张蕾, 等. 无线传感器网络中一种基于移动 Sink 的数据收集算法[J]. 传感技术学报, 2012, 25(5): 673 - 677
Zhang Lei, et al. Mobile sink-based data gathering algorithm in wireless sensor networks[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2012, 25(5): 673 - 677. (in Chinese)

作者简介



徐 佳 男, 江苏常州人, 1980 年 10 月出生, 中国电子学会会员, 南京邮电大学副教授, 硕士生导师. 2010 年获得南京理工大学计算机应用专业博士学位, 主要从事群智感知、无线传感器网络、机会网络等方面的研究工作.

E-mail: xujia@njupt.edu.cn

冯 鑫 男, 江苏镇江人, 1990 年 6 月出生. 2012 年于南京邮电大学获得学士学位, 现为南京邮电大学硕士研究生, 主要研究方向为容迟网络和无线传感器网络.

E-mail: fenghat@126.com