

多移动基站无线传感器网络生命期最大化算法^①

史久根, 江 锋

(合肥工业大学 计算机与信息学院, 合肥 230009)

摘 要: 无线传感器网络(WSN)的传感器节点一般由电池提供能源, 故能量管理在 WSN 中是一个基础问题. 针对受限多移动基站网络生命期最大化问题, 提出了一个MMBEC算法. 鉴于移动基站受到实际道路和自身能量的双重限制, 算法首先通过规划平衡子回路达到基站间负载的平衡, 然后控制基站周期性逗留达到邻近道路节点数据通信量的平衡. 由于平衡子回路是NPC问题, 采用近似算法找到近似解, 控制基站周期性逗留保证邻近道路节点能量几乎同时耗尽, 从而延长网络生命期. 模拟实验结果证明该算法与现有算法相比能提高网络生命期和吞吐量.

关键词: 无线传感器网络; 网络生命期; 多移动基站; 平衡能耗; 平衡子回路; 基站移动控制

Lifetime Maximization Algorithm for Multiple Mobile Base Stations Wireless Sensor Networks

SHI Jiu-Gen, JIANG Feng

(School of Computer and Information, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Due to the wireless sensor network (WSN) is provided by battery, energy management becomes a fundamental problem in such network. In view of the maximization lifetime problem of the restricted multiple mobile base stations network, we will propose the MMBEC algorithm in this paper. Since the mobile station was limited by the actual road and its own energy, we first balance the energy load of base stations by sub loops division, and then we move the base stations periodically in order to achieve the data traffic balance of nodes adjacent roads. Because the balancing of sub loops problem belongs to NPC problem, in this paper we proposed an approximation algorithm for the purpose of finding an approximate solution. Control the mobile base stations stay periodically ensures the energy of the nodes adjacent to roads exhaust almost at the same time, and therefore, prolong the lifetime of network. The results of simulation experiment show that the algorithm prolongs the lifetime of network and improves the throughput capacity of data when compared with the existing algorithms.

Key words: wireless sensor network; network lifetime; multiple mobile base stations; balance the energy consumption; balance sub loops; control mobile base stations

微机电系统、片上系统、无线通信和低功耗嵌入式技术的飞速发展, 孕育出无线传感器网络(Wireless Sensor Networks(WSN)), 并以其低功耗、低成本、分布式和自组织的特点带来了信息感知的一场变革. WSN 是由部署在监测区域内大量的廉价微型传感器节点, 通过无线通信方式形成的一个多跳自组织网络. 它可以广泛地应用于环境监测、医疗护理、军事和其

他商业领域, 它在过去几年受到广泛的关注. 它的一个主要用途是监控一些环境恶劣或人类难以到达的地方(如自然保护区、原始森林和核污染区域), 故难以对节点的电池进行充电或者更换. 因此高效地利用网络能源是 WSN 协议设计所面临的首要问题. 移动基站相比静止基站能大幅度提高 WSN 能源的利用效率, 而移动基站在实际应用中会受到诸多限制, 充分

^① 基金项目:国家重大仪器设备开发专项(2013YQ030595)

收稿时间:2014-02-20;收到修改稿时间:2014-03-17

考虑这些限制条件, 才能有效地提高网络的生命期.

1 相关工作

最近几年大量的研究都致力于多移动基站 WSN, 其中最大化网络生命期是目前研究的热点之一, 现有研究的主要方法有以下两类: (1)构造平衡路由树, 如文献[1]提出了在时间敏感网络中构造延迟最小且负载均衡的路由树算法. (2)构造最优的基站移动路线, 如^[2]考虑了部署多个基站的网络中找到每个基站的一个最优轨道使得网络生命期最大. 文献[3]、[4]考虑了在基站移动距离受限的情况下, 找到最优的逗留路线使得总逗留时间最长. ^[5]提出了空分多址(SDMA)技术, 在监测区域中布置移动小车收集数据. 以上研究中的算法一定程度上提高了网络能源的利用率, 延长了网络生命期, 具有重要的意义, 但算法的效率还有待提高. 本文的算法考虑了实际应用场景中的道路因素, 它的创新之一是使用了全局概率理论构造了平衡路由树, 增强了网络的可扩展性; 之二是采用了周期性逗留方式控制基站移动, 平衡了基站附近节点的能耗, 延长了网络生命期, 同时减少了网络拓扑重建次数, 增强了网络稳定性.

2 系统模型和问题定义

2.1 系统模型

大量的廉价无线传感器节点均匀随机地部署在远离监测中心的大规模区域, 区域内存在若干条连通的道路, 我们用一张局部地图来表示道路网络, 地图上显示该区域所有道路和交叉路口的情况. 区域内部署多个移动基站, 它们可在道路上的任意点处逗留同时收集数据. 传感器节点的能量不能补充, 传输半径固定为 r . 节点周期地采集数据并通过多跳通信方式传输到距离最近的基站, 基站接收到传感器数据后进行适当的压缩处理, 再通过第三方网络将数据传输到监测中心. 图 1 是本文应用场景的系统模型图.

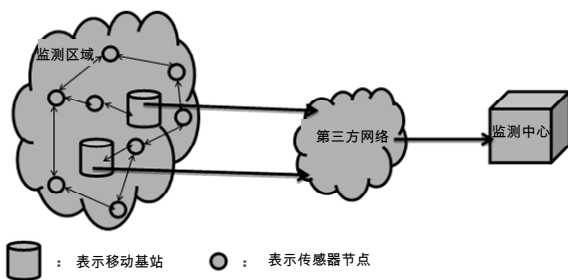


图 1 系统模型图

2.2 问题定义

我们用无向图 $G=(V,E)$ 表示 WSN, 其中 V 是区域内节点集合, E 是节点之间的链接集合. k 个移动基站为 $MS_1, MS_2, \dots, MS_k, (k \geq 2)$, 地图 $R=(V_r, E_r)$, V_r 为交叉路口集合, E_r 为道路集合. 基站移动单位长度的能耗为 e_λ , 收集传输数据时单位时间的能耗为 e_μ . G 中节点的初始能量均为 Q . 受限的多移动基站网络生命期最大化问题就是在基站的移动道路 R 和自身能量 e_M 均受到限制的情况下, 设计一个算法控制基站移动, 使得网络生命期最大化. 为了解决此问题本文提出了平衡能耗的多基站移动算法 (Multi Mobile base station algorithm of Balancing the Energy Consumption, (MMBEC)), 下一节里我们将对该算法进行具体地描述.

3 MMBEC算法

在本文系统模型中移动基站只能在道路上逗留, 故邻近道路节点需要为其他节点转发数据到基站, 其能耗大于其他节点. 所以网络生命期的最大化就是邻近道路节点能耗的最小化. 又因为总体网络的能耗基本不变, 所以最小化邻近道路节点的最大能耗就是平衡邻近道路节点的能耗.

3.1 平衡基站负载

考虑到实际情况, 平衡各基站通信负载的要求有以下几点要求: 每个基站所分配的道路长度尽量相等; 所分配的道路是一条回路; 各个回路起点相同; 各基站所分配道路的重叠部分最短; 地图上的每条道路必须被分配. 即在地图 R 中构造 k 条平衡子回路 $L_1, L_2, \dots, L_k, (k \geq 2)$, 我们称该问题为平衡子回路问题. 它类似于多邮递员中国邮路问题^[11], 已被证明为 NP 完全问题. 下面通过平衡子回路算法求该问题的近似解:

步骤 1: 从地图 R 构造辅助图 $R'(V_r, E_r)$, 然后将图 R' 增值为欧拉图 R'_E . 引用中国邮路解法^[12]求得 R'_E 的一条欧拉回路 C .

步骤 2: 易知欧拉回路 C 有 $|V_r|$ 个顶点, 即 C 有 $|V_r|+1$ 条边, 设其起点为 v_0 . 从 $|V_r|$ 个顶点中选取 $k-1$ 个顶点, 共有 $C_{|V_r|-1}^{k-1}$ 种情况, 分别记录这些顶点到起点 v_0 在图 R'_E 中的最短路径 D_1, D_2, \dots, D_{k-1} 和它们分解欧拉回路 C 得到的 k 条欧拉行迹

C_1, C_2, \dots, C_k .

步骤 3: 将欧拉行迹 C_i 的两端分别与最短路径 D_{i-1} 和 D_i 相连, 得到子回路 $L_i, 1 \leq i \leq k$. 然后计算这些子回路的权值差之和 $\sum_{1 \leq i < j \leq k} |w(L_i) - w(L_j)|$, 记作 Δw .

步骤 4: 计算所有可能的情况后得到 $\Delta w_1, \Delta w_2, \dots, \Delta w_{c_n^{k-1}}$, 比较大小, 若 Δw_i 最小, $1 \leq i \leq c_{|V_r|}^{k-1}$, 则选择对应的 k 条子回路 L_1, L_2, \dots, L_k 作为近似解.

3.2 基站移动控制

3.2.1 逗留点集合的生成

假设欧拉图 R_E 中的一条子回路为 L , 移动基站从起点开始沿回路方向将每隔距离 r_0 的点标记为逗留点. 令逗留点集合为 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$, 与逗留点距离在传输半径 r 之内的节点集合 $V_L = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$ 近似认为是回路 L 的邻居节点集合. 每个逗留点邻居节点集合组成的集合族 $S = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}$, 其中 S_i 为逗留点 s_i 的邻居节点集合.

3.2.2 数据收集传输阶段

1) 构造路由树: 网络需要构建路由树实现数据收集和传输, 用一个例子说明路由树的构造. 假设基站初始的逗留点为 s_i , 其邻居节点集合 $S_i = \{v_1^i, v_2^i, \dots, v_{|S_i|}^i\}$, 其中 $|S_i|$ 为集合 S_i 中节点个数, 这些节点的剩余能量分别为 $e(v_1^i), e(v_2^i), \dots, e(v_{|S_i|}^i)$. 构造根分别在 $v_1^i, v_2^i, \dots, v_{|S_i|}^i$ 的 $|S_i|$ 棵子路由树, 而这 $|S_i|$ 棵子树的根均是移动基站. 从总体网络上看, 以节点自身剩余能量与逗留点邻居节点集合的剩余能量的比值作为概率 $p(v^i)$, 网络中非逗留点邻居节点分别以对应概率加入以各邻居节点为根的子路由树, 可构造子孙节点数与根节点剩余能量成比例的 $|S_i|$ 棵子路由树. 其中

$$p(v^i) = \frac{e(v^i)}{\sum_{j=1}^{|S_i|} e(v_j^i)}, v^i \in S_i$$

2) 计算逗留时间: 建立好路由树后需要考虑基站数据收集阶段的持续时间. 对于逗留点 $s_i, 1 \leq i \leq n$, 其逗留时间 $t(s_i)$ 有以下要求:

- 逗留时间 $t(s_i)$ 与逗留点邻居节点集合的剩余

能量 $\sum_{j=1}^{|S_i|} e(v_j^i)$ 相关, 集合的剩余能量越少能耗越多, 逗留时间越少. 已知节点初始能量为 Q , 则逗留点邻居节点集合初始能量为 $|S_i| \cdot Q$, 集合的总能耗为 $\sum_{j=1}^{|S_i|} [Q - e(v_j^i)]$.

- 逗留点邻居节点集合的能耗程度越高, 逗留时间越少. 集合的能耗程度为集合能耗与集合初始能量

$$\text{的比值, 记作 } \eta, \eta = \frac{\sum_{j=1}^{|S_i|} [Q - e(v_j^i)]}{|S_i| \cdot Q}$$

- 当回路邻居节点集合剩余能量较少时, 为了减少基站的移动次数需要保证一定的逗留时间. $t(s_i)$ 随着逗留点邻居节点集合的能耗程度 η 的变化而变化, 设该变化函数为 $f(\eta) = \exp(-\lambda \cdot \eta)$. 该函数不会过于接近零, 且能保证 $f(\eta)$ 随着能耗程度 η 的增大而减少, λ 为指数参数, $\lambda > 0$.

- 逗留点 s_i 的邻居节点个数 $|S_i|$ 越多, 逗留时间 $t(s_i)$ 越长. 可得 $t(s_i) = |S_i| \cdot t_0 \cdot f(\eta)$, 其中 t_0 为单位逗留时间. 综上得 $t(s_i)$ 的公式如下:

$$t(s_i) = |S_i| \cdot t_0 \cdot \exp\left\{-\lambda \cdot \frac{\sum_{j=1}^{|S_i|} [Q - e(v_j^i)]}{|S_i| \cdot Q}\right\}$$

可以验证剩余能量为零时 $t(s_i) = |S_i| \cdot t_0 \cdot e^{-\lambda}$, 这个值与参数 λ 相关, 我们可以通过调整 λ 的值设定最短逗留时间. 当能耗为零时 $t(s_i) = |S_i| \cdot t_0$, 逗留时间最长, 符合实际情况.

3) 数据收集传输: 计算出移动基站的逗留时间后进行数据收集传输, 基站通过路由树收集节点的感知数据, 直到本轮的最后时刻, 重新收集回路 L 邻居节点的剩余能量信息, 寻找下一轮的逗留点.

3.2.3 寻找逗留点阶段

步骤 1: 在每一轮开始前也就是上一轮的最后时刻, 移动基站收集集合 V 中所有节点的剩余能量信息, $e(v_1), e(v_2), \dots, e(v_m)$. 然后计算集合族 S 中每个集合的剩余能量, 得到每个逗留点邻居节点集合的剩余能量 $e(S_1), e(S_2), \dots, e(S_n)$.

步骤 2: 选取邻居节点集合剩余能量最大的逗留点作为下一轮的逗留点. 当 $e(S_k) = \max\{e(S_i) | 1 \leq i \leq n\}$, 则对应的选取 s_k 作为下一轮的逗留点.

步骤 3: 基站移动到下一轮逗留点, 然后进入数

据收集传输阶段开始新一轮工作。

4 实验仿真

为了验证 MMBEC 算法的实际效果,我们在 Matlab 平台下进行了仿真实验,将 MMBEC 与 DAWN^[4]和 SDMA^[5]这两种协议进行性能上的比较.实验中采用正方形代表监测区域,区域内随机分配坐标点表示传感器节点,每个点赋有不同的初始能量值,正方形内还布置了不规则曲线段代表道路和坐标可变化的动点代表移动基站.实验中每轮结束后统计所有点的剩余能量值和数据传输量作为实验分析数据.根据不同参数,对 MMBEC 算法进行详细的模拟验证,默认参数如表 1:

表 1 模拟参数

参数	初始值
网络大小(m^2)	200×200, 400×400
节点数量(个)	100, 400
传输半径(m)	40
节点初始能量(J)	0.5~1.0
节点/基站发送接收数据能耗率(J/bit)	5×10^{-8}
节点数据压缩数据能耗率(bit/s)	5×10^{-9}
逗留点数量(个)	4, 6
基站数量(个)	2
基站最大存储能量(J)	20
基站移动时能耗率(J/m)	1×10^{-5}
道路总长度(100 m)	4,5,6,7,8,9

为了全面衡量协议性能,网络生命期分别有 3 中不同的定义:第一个节点死亡(first node die, 简称 FND),即网络中只有一个节点死亡就认为该网络已失效;一半的节点死亡(half nodes die, 简称 HND),即网络中有一半的节点死亡就认为该网络已失效;全部节点死亡(last node die, 简称 LND),即全部节点死亡才认为网络已失效.

4.1 节点死亡数量与网络运行时间的关系

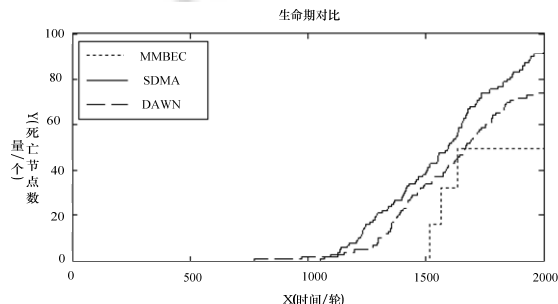


图 2 生命期对比(1)

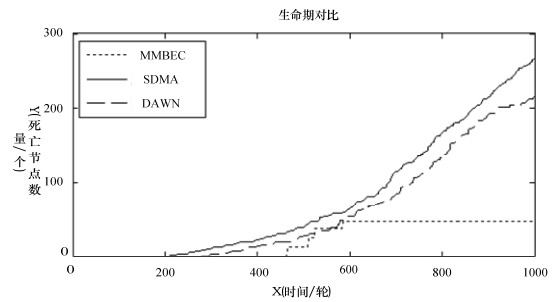


图 3 生命期对比(2)

图 2 和图 3 均是网络生命期的对比,图 2 中网络大小为 $200 \times 200 m^2$,节点数量为 100 个,逗留点数量为 4 个;图 3 中网络大小为 $400 \times 400 m^2$,节点数量为 400 个,逗留点数量为 6 个,X 轴、Y 轴分别表示网络运行时间和死亡节点的数量,可以看出 MMBEC, DAWN 和 SDMA 算法的节点死亡数量随着时间而增加,当时间相同时 MMBEC 算法节点死亡数量要小于 DAWN 和 SDMA 算法;而且 MMBEC 算法中第一个节点死亡时间(FND)比 DAWN 和 SDMA 算法都迟.这是因为 MMBEC 算法考虑移动基站只能沿着道路行驶,使得邻近道路节点的能耗大于远离道路节点,导致其能量较早的耗尽,但该算法平衡了这些邻居节点的能耗,使得它们在较短时间内一起死亡,图 2、图 3 中道路邻居节点的死亡时间分别是 1500-1650 轮和 450-600 轮,这说明 MMBEC 算法确实能保证道路邻居节点几乎同时死亡,当道路邻居节点全部死亡后网络停止工作,但是网络中还有大量远离道路的节点未死亡,我们可以向道路附近继续投放新的传感器节点,从而提高传感器节点的利用率.

4.2 道路长度对网络生命期的影响

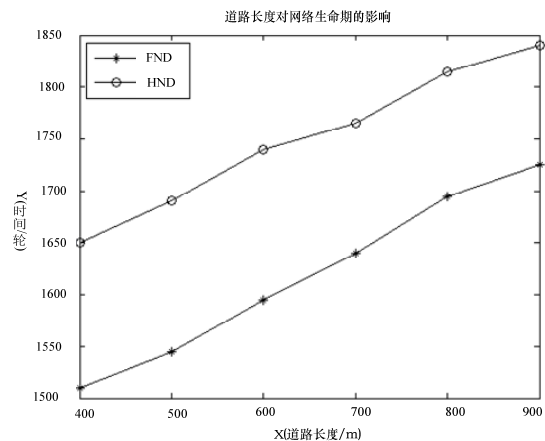


图 4 道路长度与网络生命期

图 4 中节点数量为 100 个, 网络大小为 $200 \times 200 m^2$, X 轴、Y 轴分别表示道路长度和网络运行时间, 可以看出在 MMBEC 算法中, 无论是 FND 还是 HND 网络生命期几乎随着道路长度的增加而变长. 这是因为实验中的道路是均匀分布的, 道路越长说明道路邻居节点越多, 而它们的寿命决定着网络的生命期. 当它们的数量增大时, 网络总体数据传输量变化不大, 所以每个道路邻居节点所负载的数据传输量就减少了, 能耗也随之变少, 节点的平均寿命得到提高, 从而延长了网络生命期.

4.3 数据传输量的对比

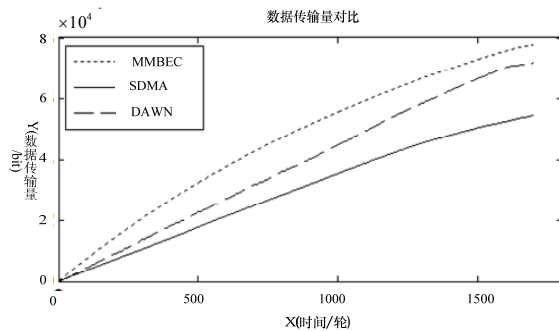


图 5 数据传输量对比(1)

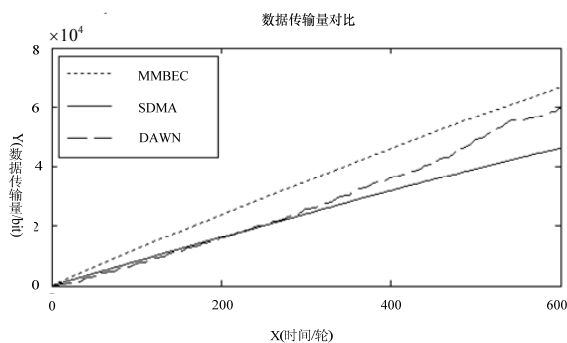


图 6 数据传输量对比(2)

图 5 和图 6 分别是图 2 和图 3 情况中的数据传输量的对比, X 轴、Y 轴分别表示网络运行时间和数据传输量, 从图 2 和图 3 可以看出图 5、图 6 中道路邻居节点全部死亡的时间分别大概为 1700 轮和 600 轮. MMBEC 算法的网络在道路邻居节点全部死亡后停止工作, 需要继续向道路附近投放新的传感器节点以维持网络运行. 在网络均正常工作时, 可以看出当网络运行时间相同时 MMBEC 算法的网络数据传输量高于 SDMA 和 DAWN 算法, 可以得出 MMBEC 算法使网络收集更多的数据, 提高了网络吞吐量.

5 结语

WSN 在实际的应用中遇到很多问题, 其中能量问题是最主要的问题之一. 本文通过 MMBEC 算法控制基站周期性移动去收集并传输数据, 解决了具有多个移动基站的 WSN 在存在道路因素的实际应用中的生命期问题, 延长了网络的生命期, 提高了网络吞吐量, 增强了网络的实用性, 最后通过大量的模拟实验证明了该算法相比已有算法的优异性能.

参考文献

- 1 Shan F, Liang WF, Luo J, Shen XJ. Network lifetime maximization for time-sensitive data gathering in wireless sensor networks. *Computer Networks*, 2013, 57(5): 1063–1077.
- 2 Liang WF, Luo J. Network lifetime maximization in sensor networks with multiple mobile sinks. 2011 IEEE 36th Conference on Local Computer Networks (LCN). 2011. 350–357.
- 3 Liang WF, Luo J, Xu X. Prolonging network lifetime via a controlled mobile sink in wireless sensor networks. *Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2010)*, 2010 IEEE, 2010. 1–6.
- 4 Tang SJ, Yuan J, Li XY, Liu YH, Chen GH, Gu M, Zhao JZ, Dai GJ. DAWN: energy efficient data aggregation in WSN with mobile sinks. 2010 18th International Workshop on Quality of Service (IWQoS). 2010. 1–9.
- 5 Zhao M, Ma M, Yang YY. Efficient data gathering with mobile collectors and space-division multiple access technique in wireless sensor networks. *IEEE Trans. on Computers*, 2011, 60(3): 400–417.
- 6 Liang WF, Schweitzer P, Xu ZC. Approximation algorithms for capacitated minimum forest problems in wireless sensor networks with a mobile sink. *IEEE Trans. on Computers*, 2013, 62(10): 1932–1944.
- 7 Xu X, Liang WF. Monitoring quality optimization in wireless sensor networks with a mobile sink. *Proc. of the 14th ACM international conference on Modeling, analysis and simulation of wireless and mobile systems*. 2011. 77–84.
- 8 Xu X, Liang WF. Placing optimal number of sinks in sensor networks for network lifetime maximization. *Communications (ICC)*, 2011 IEEE Int. Conf. on. 2011. 1–6.
- 9 Xu X, Liang WF, Wark T. Data quality maximization in sensor networks with a mobile sink. *Distributed Computing in Sensor Systems and Workshops (DCOSS)*, 2011 International Conference on. 2011. 1–8.
- 10 Luo J, Hubaux JP. Joint sink mobility and routing to maximize the lifetime of wireless sensor networks: the case of constrained mobility. *IEEE/ACM Trans. on Networking (TON)*, 2010, 18(3): 871–884.
- 11 王树禾. 几类多投递员中国邮路问题. *中国科学技术大学学报*, 1995, 25(4): 454–460.
- 12 王树禾. 图论(第 2 版). 北京: 科学出版社, 2009. 126–130.