

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2010.09.013

## 一种适用于移动节点环境的节能路由模式

孙亭<sup>1</sup>, 孙璐<sup>2</sup>

(1. 中国电子科技集团公司 第二十八研究所, 江苏 南京 210007;

2. 中国电子科技集团公司 第五十五研究所, 江苏 南京 210016)

**摘要:** 为解决簇中移动代理节点的路由及其与静止节点通信的问题, 针对现有算法存在的不足, 提出一种节省能耗的改进近似算法。根据无线传感器节点传输范围有限的特点, 将移动代理路由选择建模成一个顶点加权的游客问题。运用改进的近似算法进行路由选择, 移动代理掌控数据交互全过程, 从而保证移动代理在充分收集有用数据的前提下沿最优路径运行。实验结果表明, 与原有的操作运行过程相比, 该模式能进一步改进网络性能, 降低网络能耗, 延长网络生存时间。

**关键词:** 无线传感器网络; 路由模式; 移动代理

**中图分类号:** TP301.6; TP393.03 **文献标识码:** A

## An Energy-Efficient Routing Mode in Mobile Nodes Environment

Sun Ting<sup>1</sup>, Sun Lu<sup>2</sup>

(1. The 28<sup>th</sup> Research Institute, China Electronic Technology Corporation Group, Nanjing 210007, China;

2. The 55<sup>th</sup> Research Institute, China Electronic Technology Corporation Group, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** In order to resolve the communication problem between mobile agent and static nodes, an improved approximation algorithm is proposed which can reduce energy consumption. As the nodes' capability is limited, the routing problem in multi-hop cluster wireless sensor networks is modeled as a vertex-weighted traveling tourist problem (TTP). With this algorithm, mobile agent controlling the process and collecting data instead of cluster-head along with efficient rout can reduce energy consumption. Comparing with original operation process, simulation results show that it has better power management performance and can prolong the lifetime of the network.

**Keywords:** wireless sensor networks; routing mode; mobile agent

### 0 引言

近年来, 移动节点被越来越多地考虑到无线传感器网络中, 随着基于簇的分层路由协议的研究与实现, 簇中移动代理节点的路由选择问题也随之出现。由移动节点担任簇首的代理节点, 簇首指挥移动代理到各个节点收集有用数据, 实现数据的融合, 然后将结果数据带回簇首, 将会为整个簇降低整体能耗。簇首需要事先计算好移动代理的路由, 之后, 在保证有用数据被采集到的前提下, 使数据融合过程所消耗的能量最少, 从而最大化网络的使用寿命。文献[1]中研究了单跳分簇结构中移动代理的路由选择问题。文献[2]将这种特殊情况(只有一跳的分簇结构)推广到普遍情况(多跳分簇结构), 这些算法各有特点也各有不足。故提出一种在簇内采用移动代理的路由模式(Mobile Agent Routing Mode in Cluster, MARMC), 将网络多跳簇情况下移动代理的路由选择问题建模成为一个顶点加权的游客问题, 并给出了优化的工作模式。

### 1 基础描述

#### 1.1 节点能耗模型

采用与文献[3]相同的无线通信能量消耗模型。

节点发射  $l$  比特的数据到距离为  $d$  的位置, 其传输能耗为  $E_T(l, d) = (\alpha + \epsilon d^n)l$ 。节点接收  $l$  比特的数据消耗的能量为  $E_R(l) = \alpha l$ 。

移动代理从簇首出发, 在完成数据融合过程后, 再回到它的出发点。用  $P = \{S_0, \dots, S_i, (S_i, S_j), S_j, \dots, S_0\}$  表示移动代理所选择的一条路线,  $S_0$  代表簇首。移动代理的数据融合过程所消耗的能量定义为:

$$E_{All}(P) = \sum_{v \in P} w_v L + \sum_{(u,v) \in P} w(u,v) L$$

其中,  $L$  表示移动代理融合的结果数据的比特长度。目标是为移动代理选择一条合适的访问路线, 同时, 在保证关键数据被采集的前提下, 最小化系统的能耗  $E_{All}(P)$ 。

其中,  $n$  为路径衰减指数, 若传输距离小于某个阈值  $d_0$ , 则  $n=2$ , 功率放大损耗采用自由空间

收稿日期: 2010-03-21; 修回日期: 2010-04-30

基金项目: 国家发改委支持中国下一代网络示范工程项目(CNGI-04-17-2A)

作者简介: 孙亭(1980-), 男, 山东人, 博士, 工程师, 2008年毕业于哈尔滨工程大学, 从事无线传感器网络研究。

模型, 此时的信号放大所需要的功率  $\varepsilon = \varepsilon_{fs}$ ; 当传输距离大于等于阈值  $d_0$  时,  $n = 4$ , 采用多路径衰减模型, 此时的信号放大所需要的功率  $\varepsilon = \varepsilon_{mp}$ 。为下文的分析方便, 用变量  $\varepsilon$  统一表示 2 种情况下的信号放大功率。

数据融合也消耗一定的能量, 用  $E_{DF}$  表示融合单位比特数据消耗的能量。

## 1.2 系统模型

用无向连通图  $G(V, E)$  来代表无线传感器网络中的一个簇, 顶点  $v \in V$  代表簇中的一个传感器节点。边  $(u, v) \in E$  代表顶点  $u$  和  $v$  所对应的传感器节点能够直接通信。用  $N(v)$  代表顶点  $v$  的所有邻居,  $d(u, v)$  代表顶点  $u$  和  $v$  之间的欧氏距离。基于上面的能耗模型, 将无向图  $G(V, E)$  构造成为一个加权图  $G(V^c, E^c)$ , 其中任意一个顶点  $v$  的权值为  $w_v = 2E_R$ , 边  $(u, v)$  的权值为  $w(u, v) = \varepsilon d^n$ 。

## 2 一种低能耗的路由模式

由于传感器自身特点, 相隔距离较近的同类型传感器采集的信息会有很强的相似性, 使数据存在冗余。在这种情况下, 当一个移动代理访问了节点  $v$ , 为了减少能耗, 它可以不访问  $v$  的邻居节点, 因为访问邻居节点所获得的信息量与所消耗掉能量相比是不经济的, 特别是在节点分布比较密集情况下。这样, 路由选择目标就变成了为移动代理选择一条合适访问路线, 使簇中的节点或者位于这条路线中, 或者是这个路线上某个节点的邻居, 既能收集到足够的信息, 同时又最小化整个系统的能耗  $E_{all}(P)$ 。结合节点能耗模型和系统模型, 该类路由选择问题是一个典型的 NP 问题, 其证明过程见文献[2]。

### 2.1 路由选择

NP 完全问题目前尚未找到一种有效的多项式时间解法, 但可以找到一些近似算法在多项式时间之内求得次优解。Current 等提出了一种近似解法来解决覆盖的旅行商问题 (CS 算法)<sup>[4]</sup>, 该算法没有考虑顶点加权的情况。Guha 等在研究连通支配集问题的基础之上, 提出了一个近似算法来解决顶点加权的 TTP (GK 算法)<sup>[5]</sup>。尽管 GK 算法考虑了顶点加权的情况, 但仅仅是简单地遍历生成树, 这将导致不必要的能量损耗。基于上述 2 种算法, 笔者提出一种近似算法来解决这个问题。

首先, 用集合覆盖的贪心算法找到一个最小支

配集  $Y$ 。接着, 用改进的 Christofide 算法找到一条游客旅行回路。其中, 为了获得更好的性能, 笔者采用文献[6]中提出的近似算法来求解边加权和顶点加权的 Steiner 树, 而不是最小生成树来连接  $Y$  中的顶点。复制 Steiner 树的每一条边, 把这个 Steiner 树转变成一个欧拉图, 利用最小权匹配的多项式算法寻找该欧拉图的一条欧拉旅行线路, 最后采用“抄近路”的方法把一条欧拉旅行线路转变成一个游客旅行回路。

### 2.2 数据采集

网络在布局过程中, 总体采用基于簇的分层结构。节点完成部署后即成为静止节点。静止节点内设有参数—优先级 (PRI), 以此来确定其与移动节点进行连接通信的先后顺序, 优先级越高, 其就有越高的优先权与移动节点连接。优先级的大小根据节点监测到的数据的多少来确定, 节点监测到的数据量越大, 这时节点采集到的信息量就越多, 则优先级越高, 缓存已满时节点的优先级最高。

新路由模式的具体实现与 MAC 层相结合。首先, 簇首通过上节描述的方式确定移动代理在簇内的运行路线, 然后, 移动节点与静止节点采用合理的信息方案进行交互。

1) 在簇结构建立后, 移动节点进入前, 所有的静止节点处于 Sleep 状态, 履行其职责, 收集周围环境相关数据。当有移动节点进入时, 移动节点采用一定功率发出广播消息 (Broadcast Message)。临近移动节点的静止节点听到该信息后, 开始醒来 (Wake Up), 并向移动节点发送或报告其当前的状态信息 (Current Status Message), 移动节点根据接收到的状态信息, 决定其是否将该静止节点加入连接队列, 当不需要连接时, 其继续保持原先的状态。

2) 在 EAR 算法<sup>[7]</sup>中, 移动节点使用完全转交 (Absolute Handoff) 技术, 即当 PRI 高于连接门限时, 将与该节点连接; 当该节点的 PRI 低于断开门限或该节点消失 (在预定的时间内没有发送 BI 信息, 就认为其消失或发生故障) 时, 就断开连接。这样, 在移动节点最大连接数目限制条件下, 那些有很高 PRI 的节点有可能没被连接上, 将会丢失大量数据。

在该算法中, 预先设定好移动节点最大连接数目、连接门限以及断开门限, 当移动节点进入网络后, 随着其不断的运动, 将经过不同的节点, 每当所经过的静止节点的 PRI 高于连接门限, 且在其连

接数目没达到最大的情况下, 将该节点加入连接队列。若达到最大连接数目且这时有更高的 PRI 的节点进入网络 (高于连接门限的节点), 则将发送移动中断 (MD) 信息给已被连接上的、PRI 此时已在所有连接节点中最低的节点, 将其移出队列, 同时加入新的节点, 若遇到的新节点的 PRI 低于连接门限, 则忽略该节点。那些与移动节点断开后的静止节点将继续回到其最初状态 (Sleep)。

3) 连接队列建立后, 移动节点开始顺序向队列中的静止节点发出连接邀请 (MI)。当接收到 MI 信息, 静止节点决定其是否需要连接或可否连接, 当静止节点的能量很低或没有适合的通信信道时, 将拒绝连接请求。假如可以连接, 静止节点将发送连接响应 (MR) 信息表明接受连接请求。连接建立, 开始传输数据。

4) 当与静止节点建立连接后, 移动节点继续监测该节点, 当接收 PRI 降低到预定的断开门限或静止节点消失 (由于衰落效应) 时, 移动节点发送移动中断 (MD) 通知静止节点中断连接, 同时, 将移动节点从连接表中删除。

### 3 试验与结果分析

#### 3.1 实现细节的比较

首先, 将路由模式中的数据交互过程与 EAR 进

行比较。仿真建立在静态 MAC 协议和多跳路由基础上, 从而来仿真网络的寿命周期, 包括节点最初的分布、启动连接和建立连接、路由形式以及移动性。采用 100 个节点来进行测试, 这些节点随机分布, 假设每个静止节点以固定能量的广播形式发送信息, 发送的信息个数没有限制。而移动节点的发射功率可以有不同的选择, 每个移动节点允许登记 10 个静止节点, 在给定的时间内, 可以同时和 3 个静止节点连接。另一方面, 静止节点只允许同一个移动节点进行连接, 当有连接请求时, 移动节点为静止节点提供 5 个时隙对用来通信, 静止节点从中选择 2 对用来通信, 在连接阶段, 假定 2 个节点可以在分配的时隙中进行传输数据, 移动节点的速度可为 0~2 m/s。实验了 4 种工作环境, 每种环境下节点优先级最高级数分别设定为 10、15、20、25。

表 1 是 EAR 的仿真结果。表 1 中的时间单位为仿真系统时间单位, 在仿真过程中, 假设簇首已定下移动节点的运动路线, 因为移动节点的运动路线是由簇首设定的, 在簇首不变的情况下, 路线不再发生改变。表 1 中选用了平均每个静止节点发送信息条数和移动节点发送信息条数, 以及移动节点与网络连接时间比来参定, 通过对这些参数的比较, 可以看出在网络中引入移动节点后, 在网络中的运行状况。

表 1 EAR 的仿真结果

仿真参数	最高优先级数			
	10	15	20	25
连接门限	6	9	12	15
断开门限	1	3	5	7
系统总时间 $t/s$	3 265.667	3 328.000	3 257.600	3 307.240
平均每个静止节点发送信息数	56	44	35	29
移动节点平均发送信息数	26	20	15	11
(移动节点连接时间/总时间) /%	13.1	11.2	10.3	9.6

改进 1: 在 EAR 中, 静止节点掌控与移动节点连接的主动权, 不断向周围发送广播消息, 等待移动节点的到来, 这样将消耗大量的能量。算法中,

不使用 EAR 中的静止节点的信息, 而是由移动节点把握主动权, 发起与静止节点的数据通信。表 2 是改进 1 的仿真结果。

表 2 改进 1 的仿真结果

仿真参数	最高优先级数			
	10	15	20	25
连接门限	6	9	12	15
断开门限	1	3	5	7
系统总时间 $t/s$	3 265.667	3 328.000	3 257.600	3 307.240
平均每个静止节点发送信息数	28	21	18	16
移动节点平均发送信息数	32	30	25	23
(移动节点连接时间/总时间) /%	12.1	11.2	10.3	9.5

将表 1 与表 2 进行比较, 表 2 中的平均每个静

止节点发送信息条数比表 1 中小很多。因为对于静

止的无线网络而言，其能量的消耗主要就是各个静止节点的能量损耗，改进 1 就是保证通信正常进行的情况下，使静止节点发送较少的信息，以减少每个静止节点的能量损耗，从而延长网络的运行寿命。

改进 2：让移动节点有更大的控制权，当接收

到的信号质量达到连接门限时，就进行连接；信号质量下降到断开门限时，就断开连接，而不是像 EAR 中那样，只要连接队列满了，后续的移动节点不再考虑。表 3 是在改进 1 的基础上进行改进 2 的仿真结果。

表 3 改进 2 的仿真结果

仿真参数	最高优先级数			
	10	15	20	25
连接门限	6	9	12	15
断开门限	1	3	5	7
系统总时间 $t/s$	3 265.667	3 328.000	3 257.600	3 307.240
平均每个静止节点发送信息数	27	23	19	16
移动节点平均发送信息数	20	16	15	11
(移动节点连接时间/总时间) / %	23.8	20.0	18.5	15.6

将表 3 与表 2 进行比较，可以看出：通过改进，移动节点与网络的连接时间大大延长，也就是说，从移动节点进入网络开始，其和静止节点的通信机会就大大增多，这对于用户充分提取数据，保证数据的不失真具有极大的作用。

在这 3 个表中，最明显的还是信号接收质量问题。随着连接门限的增大，移动节点与网络的连接能力减弱，但是连接门限较低，将会存在较大的干扰，所以在设计时，要充分考虑到这些，选择最优的值，保证网络的正常运行。

### 3.2 算法整体比较

将新路由模式与 CS 算法和 GK 算法进行比较。部分实验参数取自文献[8]。

网络中节点的个数分别设置为 200、300、400、500 和 600，代表不同的节点分布密度。所有节点随机分布在一个 200 m×200 m 的矩形区域内，簇首位于这个区域的中心位置。假定移动代理的数据包长度  $L=2$  kbit，实验采用文献[3]中所提出的无线信道模型，节点的无线发射半径  $R$  分别设置为 20 m 和 30 m。为模拟实际应用环境，簇首和移动节点能量充足，每个静止节点初始能量 5 J。每经过 600 次移动代理的数据融合过程，测量一次系统能耗，实验进行多次取平均值，仿真结果如表 4。

表 4 系统能耗与节点数的关系 J

系统能耗		CS 算法		GK 算法		MARMC	
		R=30	R=20	R=30	R=20	R=30	R=20
节点数	200	107.05	131.01	107.48	132.00	105.64	128.91
	300	160.96	186.32	163.88	187.46	157.30	180.48
	400	252.24	267.20	255.56	269.15	245.52	254.64
	500	360.90	386.70	363.37	385.63	347.60	368.46
	600	438.20	456.20	446.00	459.21	422.96	430.20

由表 4 可见，路由模式与 CS 算法、GK 算法相比是低能耗的。同时也可以看出，随着网络规模的增加，无论是与 CS 算法还是与 GK 算法相比，路由模式都会节省更多的能量。在很多的应用中，无线传感器节点分布得非常密集，节点数目非常大。在这种情况下，应用该路由模式将会获得更大的性能增益。另外，还可以观察到节点无线发射半径对系统能耗的影响。减少节点的无线发射半径也就是降低了整个系统的连通性，这样会导致更多的节点加入到移动代理的传递过程，相应地也就需要更多的传递路径，整个系统的能耗也会增加，考虑顶点加权和“抄近路”的算法在这种情况下将会有更大

的优势，实验结果也验证了这一点。随着节点无线覆盖半径的减少，实施路由模式会降低更多的系统能耗。

### 4 小结

该算法是一种节省能耗的改进近似算法，且基于节省网路能耗的目的，对过程进行了改进，解决了现有的算法存在的不足。实验结果表明，与原有的操作运行过程比较起来，新指令运行过程进一步改进了网络的性能，提高了网络的连接质量，降低了网络能耗。

(下转第 51 页)

如图 3。

如上所述, 不断找出新的关键路线, 并对关键

工作进行分析调整, 直至任务总工期达到所要求目标。

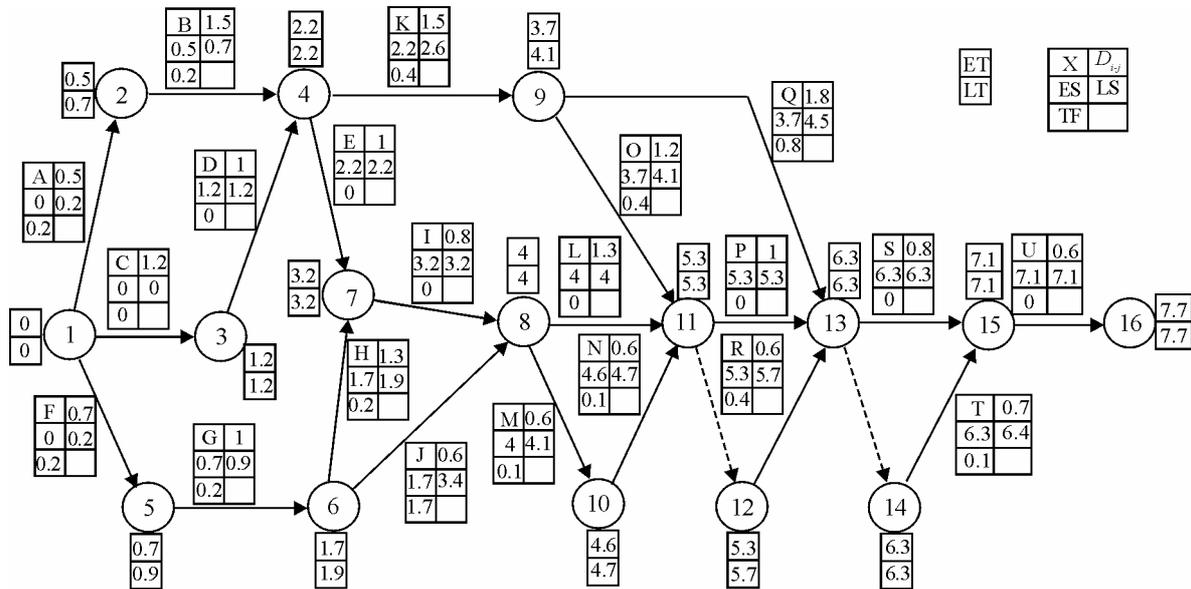


图 3 优化后的航空导弹转运网络图

### 4 总结

该研究通过优化舰载机航空导弹的转运流程, 有效地提高了效率。在确定转运过程中的关键工作后, 通过人员培训或设备工具改进, 可有效缩短工作持续时间, 进而提高整个保障效率。在调整网络图结构的情况下可有更大的优化空间。虽然笔者着重研究的是单枚导弹的转运优化问题, 但该技术也可应用到复杂任务需求下多枚导弹保障效率问题。

### 参考文献:

\*\*\*\*\*

(上接第 44 页)

### 参考文献:

[1] Wu Q., Rao N., Barhen J. On computing mobile agent routes for data fusion in distributed sensor networks[J]. IEEE Trans on Knowledge and Data Engineering, 2004, 16(6): 740-752.

[2] 曹涌涛, 何晨, 王, 等. 一种使用于无线传感器网络的低能耗移动代理路由算法[J]. 上海交通大学学报, 2008(3): 520-523.

[3] Heinzelman W., Chandraksan A., Balakrishnan H.. An application-specific protocol architecture for wireless micro-sensor networks[J]. IEEE Transaction on Wireless Communications, 2002, 1(4): 660-670.

[1] 《运筹学》教材编写组. 运筹学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.

[2] 郝杰忠, 杨建军, 杨若鹏. 装备技术保障运筹分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.

[3] 王诺. 网络计划技术及其拓广研究[M]. 北京: 人民交通出版社, 1999.

[4] 高福聚. 工程网络计划技术[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2008.

[5] 王众托. 系统工程引论[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.

[6] 李明雨, 杨萍, 毕义明. 网络计划在导弹批量测试中的应用[J]. 兵工自动化, 2005, 24(4): 19-21.

[4] Current J.T., Schilling D.A.. The covering salesman problem[J]. Transportation Science, 1989, 24(3): 208-213.

[5] Guha S., Khuller S.. Approximation algorithms for connected dominating sets[J]. Journal of Algorithms, 1998, 20(4): 374-387.

[6] Klein P. N., Ravi R.. A nearly best possible approximation algorithm for node-weighted Steiner trees [J]. Journal of Algorithms, 2005, 19(1): 104-114.

[7] 项丽, 段哲民. 无线传感器网络中移动节点接入的实现[J]. 通信技术, 2008(3): 35-42.

[8] S. R. Gandham, M. Dawande, R. Prakash, and S. Venkatesan. Energy efficient schemes for wireless sensor networks with multiple mobile base stations[C]. Los Angeles: Proceeding of the IEEE GLOBECOM, 2007.