

无线传感器网络中一种基于能量策略的路由算法

李国华^① 田辉^② 崔鸿雁^② 沈树群^①

^①(北京邮电大学 电子工程学院 北京 100876)

^②(北京邮电大学 无线新技术研究室 北京 100876)

摘要 介绍了无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)的概念和特点,在此基础上针对无线传感器网络的特点提出了一种能量效率高和能量消耗平衡的路由新算法:最小能耗路由和节点能量最大路由周期轮转。给出了在WSN中多点对一点通信的最小能耗路径和节点能量最大路径的矩阵算法。

关键词 无线传感器网络, 最小能耗路径, 节点能量最大路径, 路由轮转

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)01-0168-04

A Novel Routing Algorithm Based on Energy Policy for Wireless Sensor Network

Li Guo-hua^① Tian Hui^② Cui Hong-yan^② Shen Shu-qun^①

^①(Electronic Engineering School, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

^②(WTI, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract The concept and characters of Wireless Sensor Network (WSN) is introduced. A novel routing algorithm is created for WSN, in which minimal energy-consuming routing and maximal node-energy routing are adopted periodically, so that energy efficiency is highly improved and energy consuming is balanced over the net. A matrix algorithm of minimal energy-consuming path and a matrix algorithm of maximal node-energy path for multiple points to one point communication in WSN are given.

Key words Wireless Sensor Network(WSN), Minimal energy-consuming path, Maximal node-energy path, Routing in turn

1 引言

低功耗无线电通信技术、嵌入式计算技术和微型传感器等技术的飞速发展和日益成熟,使得大量的、低成本的微型传感器通过无线链路自组织成无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)成为现实^[1,2]。与传统的有线传感器网络(如:办公楼里的消防传感器网络)相比,无线传感器具有放置灵活、扩展简便、可以有移动节点和自组织网络等特点。特别是在人无法或避免进入的环境中,无线传感器可以通过直升机或火箭抛撒到要监测的区域,传感器自行组织成无线网络,感知其所在环境的信息并传给网络中心,完成监测任务。

WSN是自组织(Self-Organizing)网络,它一般由上千个传感器节点(Sensor node)和一个(或几个)中心节点(Data sink)组

成,没有底层的通信基础设施^[1-4]。通常传感器节点体积都非常小,只具有有限的计算能力、有限的存储能力、有限的无线通信能力和有限的电源供应(电池供电)。很显然,对成千上万个传感器节点进行充电或更换电池是不现实的,更何况有的环境人不便进入(如战场),因此提高网络能量效率、平衡网络能量消耗,延长网络运行寿命、防止网络分立,是WSN研究的核心课题。能量效率的策略体现在WSN设计的各个层面,如传感器节点的硬件设计,MAC协议,路由协议和数据融合处理等等^[1,2,4]。

在WSN中,中心节点不像传感器节点那样功能有限和能量受制,它可以进行复杂的计算,具有大容量的存储器和大的无线电发射功率,电源供应不受限制。基于这样的理由本文提出的路由算法充分利用了中心节点的强大功能,优化提高了网络性能、能量效率和能量消耗平衡。

2004-06-18收到,2004-11-02改回

国家863重大项目(2003AA1233104)及北京三星通信技术研究有限公司资助课题

2 路由算法

考虑到中心节点和传感器节点两者之间的电源供应和无线电通信能力的不同, 上下行通信采用非对称路由。传感器节点到中心节点的通信(上行通信)是多跳通信, 而中心节点到传感器节点的通信(下行通信)是单跳通信, 见图 1。下行通信无需传感器节点做中继通信, 节省了传感器节点的能量, 同时也简单实现了全网时钟同步。

WSN 的自组织过程主要集中在网络的初始化阶段, 在初始化阶段每个传感器节点通过定位技术测出自身的位置^[5], 并采用泛洪(Flooding)路由技术^[6]将位置信息传给中心节点。在中心节点依据每个传感器的位置和传感器节点的无线电通信最大半径, 得到WSN的拓扑图 $G(V,E)$, V 是传感器节点集, E 是传感器节点间的通信链路。中心节点依据WSN的拓扑图 $G(V,E)$ 和传感器节点的能量情况计算出路由, 并分发给每个传感器节点。

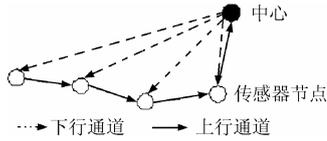


图 1 上下行通信非对称路由

2.1 上行多跳通信

无线电电磁波的能量传播模型为

$$P_{\text{receive}} = P \cdot d^{-\gamma} \quad (1)$$

其中衰减因子 $\gamma \geq 2$, d 是收发端点间的几何距离, P_{receive} 是传感器节点正确接收信号所需要的接收功率门限阈值, P 是包括了收/发天线增益和发射功率等其它因素的系数。目前电子电路技术水平在同样数据长度下, 无线电发射电路能耗 E_T 与天线辐射能量 $E_A (=E_0 d^\gamma)$ 之和大于无线电接收电路能耗 E_R , 也远大于 CPU 处理能耗 E_{cpu} ; 其中 E_0 是 P_{receive} 对应的接收门限能量。传感器间单跳通信的能量消耗为

$$E_{1\text{-hop}} = E_T + E_0 d^\gamma + E_R + E_{\text{cpu}} \quad (2)$$

(与中心节点相连的最后一跳, 没有后面两项, 因为中心节点不考虑能耗)。因此只要 γ 、 E_R 、 E_{cpu} 、 E_T 、 E_0 和每跳的距离选择适当, 多跳通信比单跳通信省能量。见图 2, 亦即下式成立

$$(E_T + E_0 d_1^\gamma) + (E_R + E_{\text{cpu}} + E_T + E_0 d_2^\gamma) + (E_R + E_{\text{cpu}}) < (E_T + E_0 d_3^\gamma) + (E_R + E_{\text{cpu}}) \quad (3)$$

小于号左边是多跳通信的能耗, 三个括号分别对应信源、中继节点和信宿的能耗; 小于号右边是单跳通信的能耗。

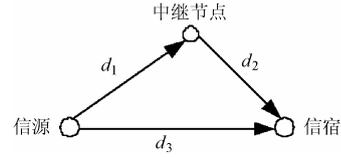


图 2 多跳通信和单跳通信

2.2 最小能耗路径

把传感器节点间单跳通信能量消耗作为权标记在图 $G(V,E)$ 的边上, 假定WSN有 N 个传感器节点和 1 个中心节点 D , 传感器节点从 1 到 N 编号, 则 $G(V,E)$ 的带权无向邻接矩阵^[7] (节点自身的权为零; 节点间没有通信链路, 则对应的权为 $+\infty$) 为

$$A = \begin{bmatrix} 0 & E_{12} & \cdots & E_{1(N-1)} & E_{1N} \\ E_{21} & 0 & \vdots & E_{2(N-1)} & E_{2N} \\ \vdots & \cdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ E_{(N-1)1} & E_{(N-1)2} & \cdots & 0 & E_{(N-1)N} \\ E_{N1} & E_{N2} & \cdots & E_{N(N-1)} & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

能与中心节点直接通信的传感器节点能耗矩阵为

$$D_1^T = [E_{1D} \ E_{2D} \ E_{3D} \ \cdots \ E_{(N-2)D} \ E_{(N-1)D} \ E_{ND}] \quad (5)$$

其中 T 表示矩阵转置, 不能与中心节点直接通信的传感器节点对应项为 $+\infty$ 。

定义矩阵运算 设 $A = (a_{ij})_{P \times M}$, $B = (b_{ij})_{M \times 1}$, 定义

$$C = A \oplus B = (c_{ij})_{P \times 1} \quad (6)$$

其中 $c_{i1} = \min\{a_{i1} + b_{11}, a_{i2} + b_{21}, \dots, a_{im} + b_{m1}\}$, 实际计算时参加这个运算的每个矩阵元素下标都要保留 (如: $a_{im} + b_{m1} = c_{im1}$, 计算结果仍在矩阵的 $i1$ 位置上; 0 和 $+\infty$ 没有下标, 与 0 相加的项保持原值和原下标序号)。

很明显所有传感器节点与中心节点之间一跳通信的最小能耗矩阵为 D_1 。

$$D_2 = A \oplus D_1$$

$$= \begin{bmatrix} 0 & E_{12} & \cdots & E_{1(N-1)} & E_{1N} \\ E_{21} & 0 & \vdots & E_{2(N-1)} & E_{2N} \\ \vdots & \cdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ E_{(N-1)1} & E_{(N-1)2} & \cdots & 0 & E_{(N-1)N} \\ E_{N1} & E_{N2} & \cdots & E_{N(N-1)} & 0 \end{bmatrix} \oplus \begin{bmatrix} E_{1D} \\ E_{2D} \\ \vdots \\ E_{(N-1)D} \\ E_{ND} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \min(0 + E_{1D}, E_{12} + E_{2D}, \dots, E_{1(N-1)} + E_{(N-1)D}, E_{1N} + E_{ND}) \\ \min(E_{21} + E_{1D}, 0 + E_{2D}, \dots, E_{2(N-1)} + E_{(N-1)D}, E_{2N} + E_{ND}) \\ \vdots \\ \min(E_{(N-1)1} + E_{1D}, E_{(N-1)2} + E_{2D}, \dots, 0 + E_{(N-1)D}, E_{(N-1)N} + E_{ND}) \\ \min(E_{N1} + E_{1D}, E_{N2} + E_{2D}, \dots, E_{N(N-1)} + E_{(N-1)D}, 0 + E_{ND}) \end{bmatrix} \quad (7)$$

D_2 中的每行元素表示: 一个传感器节点经过其他 $N-1$ 个传感器一次中继与中心节点通信, 共构成 $N-1$ 个二跳通信;

对所有两跳通信的能耗和它直接(一跳)与中心节点通信的能耗作比较,取最小值。 D_2 为传感器节点与中心节点在最大为二跳通信的情况下通信的最小能耗矩阵。那么

$$D_k = A \oplus D_{k-1} \quad (8)$$

中 D_k 的每行元素表示:一个传感器节点与中心节点通信,它经过其它 $N-1$ 个传感器节点与中心节点低于 k 跳通信的最小能耗路径,共构成最大为 k 跳的 $N-1$ 个通信路径,这 $N-1$ 个通信路径的能耗与它自身小于 k 跳通信到中心节点路径的最小能耗作计较,取最小值。 D_k 为传感器节点与中心节点在最大为 k 跳通信的情况下通信的最小能耗矩阵。 k 的最大值为 N 。当 $k < N$ 且 $D_k = D_{k-1}$ 时,提前结束计算。因此所有传感器节点与中心节点通信的最小能耗矩阵为 D_{k-1} ,这时每个传感器节点都可以以最小能耗路径进行通信, D_{k-1} 中每项的对应下标序列就是每个传感器节点与中心节点通信的能量消耗最省路径。在对 N 个路径最小能耗作比较取最小值时,如果多个路径有相同的最小能耗,则优先选取路径上节点最小能量最大的那个路径;如果路径上节点最小能量也相同,则选通信跳数多的路径;最后如果跳数也相同,则随机选一个路径。

2.3 节点能量最大的路径

把 $G(V,E)$ 变换成有向图 $G'(V,E')$,原来的无向边变为方向相反的两条有向边,有向边的权为传感,器节点初始能量(每个传感器节点都相同)减去该有向边箭头所指节点的剩余能量后的值,则 $G'(V,E')$ 的有向加权邻接矩阵(节点自身的权为0;节点间没有通信链路的权为 $+\infty$)为

$$A = \begin{bmatrix} 0 & F_{12} & \cdots & F_{1(N-1)} & F_{1N} \\ F_{21} & 0 & \vdots & F_{2(N-1)} & F_{2N} \\ \vdots & \cdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ F_{(N-1)1} & F_{(N-1)2} & \cdots & 0 & F_{(N-1)N} \\ F_{N1} & F_{N2} & \cdots & F_{N(N-1)} & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

定义 能与中心节点直接通信的传感器节点伪能耗矩阵(这样命名是为了区分前面的 D_1)为

$$W_1^T = [F_{1D} \quad F_{2D} \quad F_{3D} \cdots F_{(N-2)D} \quad F_{(N-1)D} \quad F_{ND}] \quad (10)$$

其中 T 表示矩阵转置,不能与中心节点直接通信的传感器节点对应项为 $+\infty$,能与中心节点直接通信的传感器节点对应项为 $+\xi$ (无穷小,有下标)。

很明显传感器节点与中心节点之间一跳通信的最小伪能耗矩阵为 W_1 。采用上一节的结果,得到每个传感器节点与中心节点在最大为 k 跳通信的情况下通信的最小伪能耗矩阵为

$$W_k = A \oplus W_{k-1} \quad (11)$$

其中 k 的最大值为 N 。当 $k < N$ 且 $W_k = W_{k-1}$ 时,提前结束计算。所有传感器节点与中心节点通信的最小伪能耗矩阵为

W_{k-1} 。

根据图 $G'(V,E')$ 中边权的定义,可以得出 W_{k-1} 中每项的对应下标序列就是每个传感器节点与中心节点通信的节点剩余能量最大路径(唯一的区别是:如果多个路径中节点最小能量最大也相同,则选通信跳数少的路径)。因为如果有一个传感器节点与中心节点通信,假设还有一条路径,它的跳数不大于所选定路径的跳数,且它具有的节点能量比所选定路径的节点能量还要大,那么根据图 $G'(V,E')$ 中边权的定义,这条路径必定是 W_{k-1} 中对应项下标序列确定的路径,故假设的路径是不存在的。

2.4 两个路由方法周期轮转

很明显沿节点能量最大的路径路由是动态路由,需要周期性改变;它能平衡网络的能量消耗,但没有考虑节省能量,网络的整体寿命将下降。而沿能量最省的路径路由基本上是静态路由,能节省能量消耗,但没有考虑网络的能量消耗平衡;某些关键节点能量消耗过快,将导致网络分立和出现监测黑洞,网络性能下降。为了实现既节省能量又平衡网络能量消耗,本文采用周期轮转这两种路由的方法,最小能耗路由带来的网络能量消耗不平衡将由节点能量最大路由来平滑。由于在中心节点内集中式计算路由,路由对中心节点而言是确定已知的,中心节点自己能计算出来,因此无须对网络剩余能量进行扫描,减少了网络控制业务,进一步节省了能量。节点能量最大路由的改变周期越小,得出的节点能量最大新路径就越能匹配当前网络的能量状况,这将使网络的能量消耗更均衡。

3 仿真实验

仿真环境的设置:在半径为500m的圆平面上以圆点为中心 $40m \times 40m$ 间隔均匀放置488个传感器节点,中心节点放置在平面的中心。均匀随机选择传感器发送,每次发送完都更新路由信息。比较单独使用这两种路由算法和周期轮转这两种算法后的网络剩余能量情况和分布情况。假定每个传感器节点的初始能量均为1000000能量单位,传感器节点无线电通信能力最大为60m(这样使得对角的两个传感器节点也能通信),且发射功率闭环可控。 $E_T=20$ 能量单位, $E_R+E_{cpu}=30$ 能量单位, $\gamma=3$ 和 $E_0=0.01$ 。

图3表示在均匀随机选择4000次个传感器发送后,内径为240m、外径刚小于280m的圆环内36个传感器节点在分别采用3种路由算法后的剩余能量情况。虚线代表采用能耗最小路由后的传感器节点剩余能量状况,虚线的谷值处是坐标轴上传感器节点的剩余能量,因为这些节点依据路由算法和网络仿真设置被选为中继节点的概率更大。点划线代表采用节点能量最大路由后的传感器节点剩余能量状况,它的谷

值处是靠近 $\pm 45^\circ$ 和 $\pm 135^\circ$ 角线上传感器节点的剩余能量, 因为这些节点依据路由算法和网络仿真设置被选为中继节点的概率相对较大。实线代表采用周期轮转两种路由后的传感器节点剩余能量状况, 尽管它上面仍留有两种路由的特征, 但它的确十分有效地折中了节省能量和剩余能量均衡的关系。

仿真结果表明: (1)采用最小能耗路由后, 网络剩余能量总额最大, 但分布极不平衡, 继续运行下去将导致某些节点耗尽能量, 引起监测黑洞和网络分立。(2)采用节点能量最大的路径路由时, 网络剩余能量总额相对较少, 但分布较为均匀。(3)采用两种路由算法轮转时, 网络剩余能量总额比较多, 而且十分有效地平衡了网络能量, 使得网络寿命最大化。这样的结论是可以推广到随机网络的。

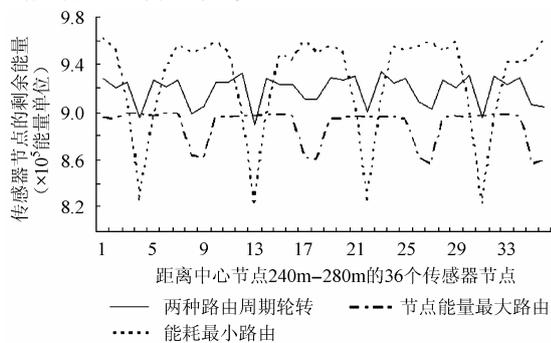


图3 3种路由方法的传感器节点剩余能量比较

4 结束语

本文提出了在WSN中采用上下行通信不对称的路由方式, 和最小能耗路由与节点能量最大路由由周期轮转的方法, 有效提高了WSN网络的能量效率, 均衡了网络能量消耗, 延长了网络寿命。集中式路由计算有效解决了传感器节点计算能力弱的瓶颈, 无须对网络剩余能量进行扫描。文中还给出了多点对一点通信时最小能耗路由和节点能量最大路由的

矩阵算法, 该算法的计算复杂性为多项式复杂性; 该算法稍作改进, 还能使剩余能量低的传感器节点不参与通信中继, 只作为信源节点工作, 保证WSN所收集的信息在空间域上的完整性。

参考文献

- [1] 任丰原, 黄海宁, 林闯. 无线传感器网络[J]. 软件学报, 2003, 14(7): 1282 – 1291.
- [2] Edgar H C. Wireless Sensor Networks: Architecture and Protocol[M]. New York: Auerbach Publications, 2004: 21 – 110.
- [3] Shen Chien Chung, Srisathapornphat C, Jaikaeo C. Sensor information networking architecture and applications[J]. *IEEE Personal Communications*, 2001, 8(4): 52 – 59.
- [4] Cerpa A, Estrin D. ASCENT: Adaptive Self-Configuring sensor Network Topologies[A]. INFOCOM 2002[C], New York, June 2002, Volume3: 1278 – 1287.
- [5] 马祖长, 孙怡宁. 无线传感器网络节点的定位算法[J]. 计算机工程, 2004, 30(7): 13 – 14.
- [6] 马祖长, 孙怡宁. 大规模无线传感器网络的路由协议研究[J]. 计算机工程与应用, 2004, 40(11): 165 – 167.
- [7] 卢开澄, 卢华明. 图论及其应用(第二版)[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001, 第六章.

李国华: 男, 1968年生, 博士生, 研究方向为无线传感器网络、自组织网络和无线通信新技术.

田 辉: 男, 1963年生, 副教授, 研究方向为移动通信新技术、无线网络和自组织网络.

崔鸿雁: 女, 1977年生, 博士生, 研究方向为无线网络和无线IP网络.

沈树群: 男, 1945年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为智能信号处理、射频识别和无线自组网.