

无线传感器网络中基于梯度的拓扑控制算法

阎新芳, 段磊, 李腾

YAN Xinfang, DUAN Lei, LI Teng

郑州大学 信息工程学院, 郑州 450052

College of Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450052, China

E-mail: yidian16@yahoo.com.cn

YAN Xinfang, DUAN Lei, LI Teng. Topology control protocol based on gradient for wireless sensor network. Computer Engineering and Applications, 2011, 47(2): 95-98.

Abstract: For wireless sensor network, according to the protocol of directed diffusion, this paper introduces an energy-efficient topology control protocol based on gradient (ETBG) to reduce the level of the hierarchical clustering, so that time delay can be reduced. At the same time, Mobile-Base-Station is used to balance the energy and the network lifetime is loaded and prolonged. The simulation result shows the effectiveness of the method.

Key words: wireless sensor network; gradient; mobile-base-station; topology control; hierarchical clustering

摘要: 对无线传感器网络, 根据定向扩散协议提出一种基于梯度场拓扑控制算法 (ETBG), 以减少分级簇等级, 从而达到降低时延的目的, 同时采用基站移动的方法平衡网络负载, 进一步提高网络的生存期。最后通过仿真验证算法的有效性。

关键词: 无线传感器网络; 梯度场; 基站移动; 拓扑控制; 分级簇

DOI: 10.3778/j.issn.1002-8331.2011.02.030 文章编号: 1002-8331(2011)02-0095-04 文献标识码: A 中图分类号: TP393

1 引言

无线传感器网络是由一组能量有限的传感器节点通过无线自组织构成, 不需要固定网络支持的无线网络。它是一种以数据为中心的网络, 其目的是将节点收集的信息发送到汇聚节点 (sink 节点), 而传送的数据对于从源节点到达 sink 节点之间所经过的节点没有任何意义。因此, 如何建立一个有效的路由拓扑, 利用有限的能量高效地传送数据成为无线传感器网络的一个研究热点。

目前有关无线传感器网络路由拓扑协议的研究主要分为以下几类: 经典的洪泛路由协议^[1]、基于能量感知的路由协议^[2]、定向扩散协议^[3]、基于地理位置的路由协议 GEAR^[4]以及 LEACH 协议^[5]和其相关的改进协议, 基于支配集的分簇算法^[6-8]。但这些协议有优点也有缺点: 例如洪泛路由协议采用广播的形式, 通信量过大, 定向扩散协议是基于梯度的平面路由协议, 并没有考虑网络节点间的能量平衡, GEAR 协议过于依赖精确定位算法, 节点成本较高。

文献[9]中提出了一种能量有效的拓扑控制算法 EAHC, 采用贪婪算法和邻域深度搜索法建立一条能量最大的链路, 能够有效地延长网络的生存周期。但 EAHC 建立的分级簇等级较高, 数据分组跳数较大, 延时较高。因此文中参考定向扩散协议中梯度的思想提出了一种根据节点的通讯半径把网络建成一个梯度场, 以减少分级簇等级, 同时针对特定网络配合

基站移动^[10]来延长生存周期的拓扑控制算法。

2 网络模型及能量模型

2.1 网络模型

可以用一个连通的无向加权图 $G=(G(V), G(E), G(w))$ 来表示无线传感器网络, 其中: $G(V)=\{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 是一组节点的集合, 分别对应每个无线传感器节点; $G(E)=\{e_{v_i v_j}\}$ 是边的集合, 每条边 $e_{v_i v_j}$ 表示两个传感器节点 v_i 和 v_j 彼此都在对方的无线发射范围 r 内, 即两者之间存在一条双向通信链路; $G(w)=\{w(v_1), w(v_2), \dots, w(v_1), \dots, w(v_n)\}$, 其中 $w(v_i)$ 是节点 v_i 的权值。

假设无线传感器节点随机分布在一个正方形区域内, 区域内的节点具有以下性质:

- (1) 节点静止地分布在区域内, 只有上线和下线状态。
- (2) 无线链路是双向通路, 节点 a 能收到节点 b 的消息, 则节点 b 也能收到节点 a 的消息。
- (3) 节点是同构的, 即有相同的初始化能量, 数据处理能力和通信能力。
- (4) 节点不具有能量续航能力, 初始化能量用完, 节点死亡 (下线)。
- (5) 节点具有最大功率范围, 且在最大功率范围内, 节点

基金项目: 河南省自然科学基金 (the Natural Science Foundation of Henan Province of China under Grant No.72300410430)。

作者简介: 阎新芳 (1958—), 女, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向为网络图论与系统优化、无线通信网络; 段磊 (1984—), 男, 硕士生, 主要研究方向为无线传感器网络的拓扑控制。

收稿日期: 2009-04-27 修回日期: 2009-06-17

功率可调。

(6) 节点是主动的, 周期地向基站传送数据。

(7) 监测区域边界可达, 基站可移动(pda等可移动设备), 基站能够在监测区域边界移动, 并且基站具有覆盖整个监测区域的能力。

2.2 能量模型

文中采用文献[5]给出的传感器节点的收发器能量模型, 即若将一个 k bit 的信息传送距离 d , 则为了发送这个信息收发器的耗能为:

$$E_{Tx}(k, d) = E_{Tx-elec}(k) + E_{Tx-amp}(k, d) = E_{elec} \times k + \varepsilon_{amp} \times k \times d^2 \quad (d \leq d_0)$$

$$E_{Tx}(k, d) = E_{Tx-elec}(k) + E_{Tx-amp}(k, d) = E_{elec} \times k + \varepsilon_{amp}' \times k \times d^4 \quad (d > d_0)$$

为了接收这个信息收发器的耗能为:

$$E_{Rx}(k) = E_{Rx-elec}(k) = E_{elec} \times k$$

其中: E_{elec} J/bit 表示发射装置(Transmit Electronics)和接收电路(Receive Electronics)每发送和接收单位比特的耗能。本文中: $E_{elec} = 50$ nJ/bit, $\varepsilon_{amp} = 100$ pJ/bit/m², $\varepsilon_{amp}' = 0.013$ pJ/bit/m⁴, $d_0 = 87.7$ m, $k = 128$ bit。

3 算法描述

3.1 定义

定义一个简化节点: $struct Node\{char\ level; char\ id; char; float\ w_1; float\ w_2; char\ par\}$, 其中 $level$: 节点的梯度等级; id : 节点的 id 值; w_1 : 节点的第一权值(剩余能量); w_2 : 节点的第二权值(节点邻居节点个数的倒数); par : 节点的父亲节点(节点到基站路由的下一跳节点)。

$Gradient(R, level)$: 建立基本梯度等级消息(广播消息), R : 当前BS的通信半径; $level$: 当前要建立的梯度等级。

$Neighbor(level, w_1, w_2, id)$: 邻居节点交换参数消息(一跳广播消息), 参数含义同简化节点中参数含义。

$Add_cluster(level, cluster_id, id)$: 加入簇消息(一跳广播消息), $cluster_id$ 为要加入簇头的 id , id 为发送消息的 id 值。

$Change_level(level, id)$: 节点梯度等级改变消息(一跳广播消息), $level$ 为节点改变梯度等级后的梯度等级, id 为发送消息的 id 值。

定义1 同梯度等级集合 U_i : 对于一个网络 G , 有:

$$U_i = \{v | v \in G(V), \text{且 } node(v).level = i\}$$

i 为该集合的梯度等级。

定义2 梯度等级集合 U : 对于网络中的某个节点:

$$U = \{U_i | k \text{ 为该节点收到的所有梯度等级}\}$$

对 U 和 U_i 分别有运算:

$\text{Min}(U) = U_j$, j 为集合 U 中元素集合的最小梯度等级(j 值最小);

$\text{Max}(U_i) = m$, m 为集合 U_i 中权值最大的节点的 id ;

$\text{Level}(U_i) = i$, i 为集合 U_i 的梯度等级。

3.2 算法

假设网络中节点的通信半径为 R , 监测区域距离基站的距离为 D 。初始化时, 基站节点 $node(BS).level = 0$, $node(BS).w_2 = 0$; 其他节点 $node(i).level = L$ (i 不等于 BS , L 足够大); $node(i).w_1 = \text{init_energy}$ (初始化能量)。

第一次组网时, 全网发送一跳广播信息, 节点获得邻居节点的个数及 id , 并计算自己的第二权值 w_2 。

第一阶段基本梯度的建立:

(1) 基站节点(BS)依次以 nR ($n=1, 2, \dots, [D/R]$, 其中 $[D/R]$ 为整数, 且 $D/R \leq [D/R] < D/R+1$) 为通信半径发送建立梯度消息 $Gradient(nR, n)$ 。

(2) 网络中梯度未定的节点(节点梯度等级为初始值 L) i 收到 $Gradient(nR, n)$ 消息后, $node(i).level = n$, 梯度已定的节点丢弃该消息。

第二阶段簇树的建立:

(1) 网络中任一节点 v 发送一跳广播消息 $Neighbor(node(v).level, node(v).w_1, node(i).w_2, v)$ 交换邻居节点信息。节点 i 根据收到 $Neighbor$ 消息, 记录邻居节点个数及 id , $node(i).w_2 = 1/k$, k 为节点 i 的邻居节点数目, 作为下一次组网的第二权值, 并根据接收到 $Neighbor$ 消息的建立本节点邻居节点的梯度集等级集合 U 。

(2) 如果对于节点 i (非基站节点) 有 $node(i).level = \text{Level}(\text{Min}(U)) + 1$ 。

① 如果节点 i 还未发送 $Add_cluster$ 消息, 则检查本节点的邻居节点最小梯度等级集合 $\text{Min}(U)$ 中的节点状态, 如果 $\text{Min}(U)$ 中的节点都发送了 $Add_cluster$ 消息(如果 $\text{Min}(U)$ 中仅有基站节点, 则认为其已经发送过 $Add_cluster$ 消息), 设置 $node(i).par = \text{Max}(\text{Min}(U))$ 并发送一个 $Add_cluster(node(i).level, node(i).par, i)$ 消息; 如果 $\text{Min}(U)$ 中还有未发送 $Add_cluster$ 消息的节点, 则等待所有 $\text{Min}(U)$ 中的节点发送 $Add_cluster$ 消息。

② 如果节点 i 已经发送了 $Add_cluster$ 消息, 则等待所有邻居都发送了 $Add_cluster$ 消息后, 节点退出算法。

(3) 如果对于节点 i (非基站节点) 有 $node(i).level < \text{Level}(\text{Min}(U)) + 1$, 则 $node(i).level = \text{Level}(\text{Min}(U)) + 1$, 发送一个 $Change_level(node(i).level, i)$ 消息, 转到第二阶段步骤(2)执行。

(4) 节点 i 收到节点 v 的 $Add_cluster(node(v).level, node(i).par, v)$ 消息, 如果 $node(v).par = i$, 则添加 v 到自己的孩子集中, 更新邻居节点的是否发送 $Add_cluster$ 状态; 如果 $node(v).par \neq i$, 则仅更新更新邻居节点的是否发送 $Add_cluster$ 状态。然后根据自己的梯度等级 $node(i).level$ 和自己邻居最小梯度等级 $\text{Level}(\text{Min}(U))$ 的关系进入第二阶段步骤(2)或步骤(3)执行。

(5) 节点 i 收到节点 v 的 $Change_level(node(v).level, v)$ 消息, 根据 $node(v).level$ 更新自己的邻居梯度集合 U 。然后根据自己的梯度等级 $node(i).level$ 和自己邻居最小梯度等级 $\text{Level}(\text{Min}(U))$ 的关系进入第二阶段步骤(2)或步骤(3)执行。

权值大小的判断: 下列任一情况, 认为节点 x 的权值大于节点 y 的权值:

(1) $node(x).w_1 > node(y).w_1$;

(2) $node(x).w_1 = node(y).w_1$ 并且 $node(x).w_2 > node(y).w_2$;

(3) $node(x).w_1 = node(y).w_1$ 同时 $node(x).w_2 = node(y).w_2$,

$x < y$ 。

经过上述步骤后, 网络便建立成以BS节点为圆心的近似同心圆梯度场, 路由表的下一跳节点为该节点的父亲节点(簇头节点)。图1是ETBG和EAHC在通信半径 $R=60$ m时的一个特例组网示例图, 其中图中每一个符号代表一个节点, 相同的符号代表节点的分簇等级相同, 此特例中ETBG算法组网中的节点到基站的跳数要小于EAHC算法组网中节点到基站的跳数。

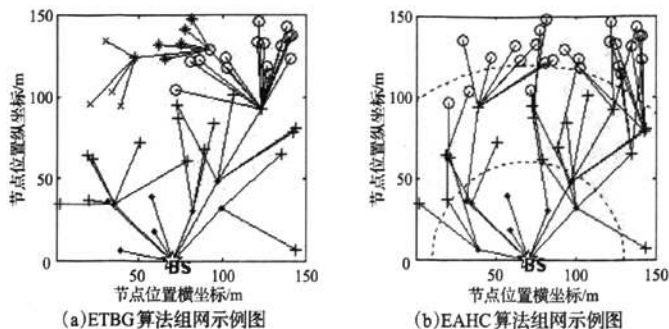


图1 组网示例比较图

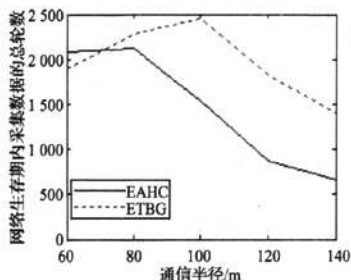


图2 网络生存周期 vs 通信半径

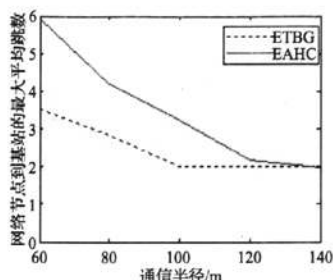
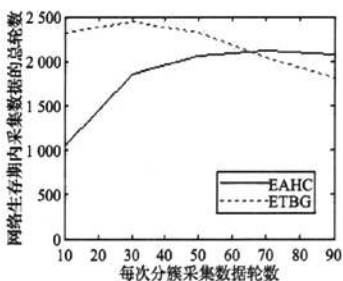
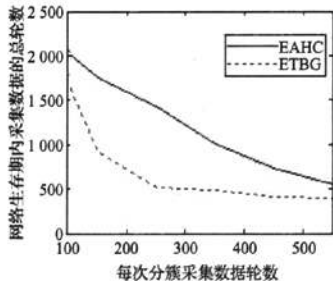


图3 节点到基站平均最大跳数 vs 通信距离



(a) 每次分簇数据采集轮数(10~90)



(b) 每次分簇数据采集轮数(90~550)

图4 网络生存周期 vs 每次分簇数据采集轮数

针对监测区域边界可达,基站能够移动的场景,采用每次组网采集数据一定轮数后,移动基站到其他边界,重新组网采集数据,不断平均整个监测边界区域附近节点的能量消耗。这样可以避免在固定基站情况下,节点能量消耗仅在单一边界附近节点之间平均,造成网络周期较短的弊端。

4 算法分析

定义3^[5] 网络生存周期:网络中第一个节点死亡时数据采集的轮数。

定义4 每次分簇数据采集轮数:数据每采集一定轮数,网络重新组网,则此数据采集轮数称为每次分簇数据采集轮数。

通过Matlab在150 m×150 m的区域内生成50个不同的拓扑,每个拓扑随机抛洒50个节点,对这50个拓扑生成的数据做平均运算得到的数据来分析算法性能。每次重新组网(重新分簇),基站在(70,0),(150,70),(80,150),(0,80)四个位置依次变换。由图2可以看到,ETBG算法能够有效地提高网络生存周期。同时也可以看到,网络生存周期随通信距离的变化成折线变化。这是由于通信距离较小时,基站的通信距离内覆盖的节点较少,即基站通信距离内节点要转发更多的消息,同时能量的消耗在较少的节点之间平衡,导致网络生存

周期较短;而随着通信距离增大,基站通信距离内覆盖节点数慢慢增多,基站通信距离内节点要转发消息减少,能量的消耗可以在较多的节点之间平衡,网络生存周期逐渐延长;但随通信距离的进一步增加,单次通信消耗大大增加,网络生存周期迅速下降。

图3是两种算法节点到基站的平均最大跳数与通信距离之间的关系图。ETBG算法中的节点到基站的平均最大跳数要小于EAHC算法中节点到基站的平均最大跳数,较小的跳数能够提供较低的网络延时。

图4是两种算法分别达到网络生存期最大值时的网络生存期与每次分簇采集数据轮数之间的关系图。由图中可以看出ETBG在每次分簇采集数据轮数为20~40时网络能达到较大生存周期。同时,从图中也能看到,网络生存周期在每次分簇数据采集轮数在一定范围内时能够达到最大值。这是由于在每次分簇数据采集轮数较小时,网络生存周期内分簇次数较多,组网消耗较大,网络生存周期较小;而每次分簇数据采集数较大时,每轮组网收集数据较多,消耗较大,不利于能量消耗在节点间平衡,导致在其他节点还有较多能量时,个别节点死亡,网络生存周期减小,只有在适当的每次分簇数据采集数才能使网络周期达到最大值。

5 结论

提出的基于梯度的拓扑控制算法,选择权值较大的节点作为下一跳节点,同时利用基站移动平衡监测区域边界节点的能量消耗,与EAHC算法相比较能够更有效地提高网络的生存周期。通过建立以基站为中心的近似同心圆梯度场,能减小网络中节点到基站的跳数,即分级簇的等级,有效地减小了网络数据传输延时。下一步将对网络的维护更新作进一步研究。

参考文献:

- [1] Hedetniemi S, Liestman A. A survey of gossiping and broadcasting in communication networks[J]. Networks, 1988, 18(4): 319-349.
- [2] Shah R, Rabaey J. Energy aware routing for low energy ad hoc sensor networks[C]//Proceeding of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Orlando, U.S.A: IEEE Communications Society, 2002: 350-355.
- [3] Intanagonwiwat C, Govindan R, Estrin D. Directed diffusion: A scalable and robust communication paradigm for sensor network[C]//Proceedings of the 6th ACM/IEEE International Conference on Mobicom'00, Boston, U.S.A, 2000: 56-67.
- [4] Estrin D. Geographical and energy-aware routing: A recursive data

dissemination protocol for wireless sensor networks, UCLA-CSD TR-01-0023[R]. UCLA Computer Science Department, 2001.

- [5] Heinzelman W, Chandrakasan A, Balakrishnan H. Energy-efficient communication protocols for wireless sensor networks[C]//IEEE Proceedings of the Hawaii International Conference System Sciences'00, Hawaii, U.S.A, 2000: 3005-3014.
- [6] An Na, Yan Xinfang, Zhu Yufang, et al. A virtual backbone network algorithm based on the multilevel cluster tree with gateway for wireless sensor networks[C]//Proceedings International Communication Conference on Wireless Mobile and Sensor Networks, 2007: 462-465.
- [7] 阎新芳, 刘爱琴, 杨挺. 基于极小独立支配集的MANET虚拟骨干网算法[J]. 电子学报, 2007, 35(6): 1134-1138.
- [8] 阎新芳, 孙雨耕, 胡华东. 基于极大权的最小连通支配集启发式算法[J]. 电子学报, 2004, 32(11): 1774-1777.
- [9] 阎新芳, 孙雨耕, 赵承利. 无线传感器网络中基于能量的分级簇算法[J]. 天津大学学报, 2005, 38(12): 1106-1110.
- [10] Gandham S R, Dawande M, Prakash R, et al. Energy efficient schemes for wireless sensor networks with multiple mobile base stations[C]//IEEE Global Telecommunications Conference, 2003, GLOBECOM'03, 2003: 377-381.

(上接 67 页)

表1 机房温度多传感器采样数据

	传感器1	传感器2	传感器3	传感器4	传感器5	传感器6
采样点1	25.7	26.1	25.9	24.8	25.1	26.9
采样点2	26.3	25.4	27.0	25.6	26.1	25.3
采样点3	25.4	26.2	25.9	24.9	25.3	26.7
采样点4	24.9	25.7	24.8	26.1	25.5	26.1

若采用算术平均算法,得到的4组温度平均值为25.75, 25.95, 25.73, 25.52;相应其标准差分别为0.75, 0.65, 0.66, 0.57。

在多传感器模式下数据融合平台进行融合处理,经判断离异数据,并进行融合运算得出结果,得4组数据融合值为25.93, 25.86, 25.53, 25.73;剔除离异数据后相应标准差为0.20, 0.10, 0.21, 0.23。

数据融合平台切换融合算法为单传感器数据融合算法时,1个温度传感器在6个采样时刻测取1组温度数据如表2所示。

表2 机房温度单传感器采样数据

传感器1	26.7	26.1	25.9	25.8	25.1	24.8
------	------	------	------	------	------	------

若采用算术平均算法,得到的温度数据平均值为25.73,得其方差为0.69。经单传感器数据融合后温度融合值为25.96,方差为0.25;其结果亦优于算术平均算法得到的计算值的方差。

故使用数据融合平台获得的测量数据较普通传感器简单测量记录或简单使用均值滤波更为可靠精确。

(上接 87 页)

- [5] Szerwinski R, Güneysu T. Exploiting the power of GPUs for asymmetric cryptography[C]//LNCS 5154: CHES 2008, 2008: 79-99.
- [6] Moss A, Page D, Smart N P. Toward acceleration of RSA using 3D graphics hardware[C]//LNCS 4887: Cryptography and Coding, 2007: 364-383.
- [7] Yang J, Goodman J. Symmetric key cryptography on modern graphics hardware[C]//LNCS 4833: ASIACRYPT 2007, 2007: 249-264.
- [8] Fleissner S. GPU-accelerated montgomery exponentiation[C]//LNCS

5 结束语

介绍了基于三星S3C2440的ARM9嵌入式数据融合平台的设计与实现,该平台可运用于工业控制环境,为工业生产提供较新的数据融合技术支持,同时发挥嵌入式系统在此环境下独到的优越性。在冶金炉窑、石油钻井、原料场、仓库等参数检测与控制场合具有较好的应用前景,具有一定理论价值和实际应用价值。

参考文献:

- [1] 杨万海. 多传感器数据融合及其应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2004.
- [2] Akyildiz I F, Su W, Sankarasubramaniam Y, et al. A survey computer networks[J]. Wireless Sensor Networks, 2002, 38(4): 393-422.
- [3] 张在利, 秦超英, 邓奎彪. 基于带无偏输入的加权融合算法[J]. 计算机工程与设计, 2009, 30(14).
- [4] 蔡菲娜, 刘勤贤, 朱根兴, 等. 数据融合方法在单传感器系统中的应用[J]. 数据采集与处理, 2005, 20(1).
- [5] 曹林, 童维勤, 邵丹. Qtopia Core在嵌入式Linux上的移植及应用[J]. 微计算机信息, 2009, 25(20).
- [6] Waltz E, Lilnas J. Multisensor data fusion[M]. Boston: Artech House, 2000: 9-17.
- [7] Wall K, Watson M, Whitis M. Linux programming[M]. Sams, 1999.

4487: ICCS 2007, 2007: 213-220.

- [9] Harrison O, Waldron J. Efficient acceleration of asymmetric cryptography on graphics hardware[C]//LNCS 5580: AFRICACRYPT 2009, 2009: 350-367.
- [10] 董元满. 高性能公钥密码协处理器的设计与实现[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2004.
- [11] Tenca A F, Koç Ç. A scalable architecture for modular multiplication based on montgomery's algorithm[J]. IEEE Trans Computers, 2003, 52(9): 1215-1221.