ISSN 1000-9825, CODEN RUXUEW
Journal of Software, Vol.18, No.5, May 2007, pp.1110−1121
DOI: 10.1360/jos181110
© 2007 by *Journal of Software*. All rights reserved.

E-mail: jos@iscas.ac.cn
http://www.jos.org.cn
Tel/Fax: +86-10-62562563

数据收集传感器网络的负载平衡网络构建方法*

张重庆+, 李明禄, 伍民友

(上海交通大学 计算机科学与工程系,上海 200240)

An Approach for Constructing Load-Balancing Networks for Data Gathering Wireless Sensor Networks

ZHANG Chong-Qing+, LI Ming-Lu, WU Min-You

(Department of Computer Science and Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

+ Corresponding author: Phn: +86-21-34204045, E-mail: zhangchongqing@sjtu.edu.cn, http://www.sjtu.edu.cn

Zhang CQ, Li ML, Wu MY. An approach for constructing load-balancing networks for data gathering wireless sensor networks. *Journal of Software*, 2007,18(5):1110−1121. http://www.jos.org.cn/1000-9825/18/1110.htm

Abstract: Wireless sensor networks are characterized by centralized data gathering, multi-hop communication and many-to-one traffic pattern. These three characteristics may give rise to funneling effects that can lead to severe packet collision, network congestion, packet loss and even congestion collapse. This can also result in hotspots of energy consumption that may cause premature death of sensor nodes and even premature death of entire network. Load-Balancing techniques can effectively avoid the occurrence of funneling effects. Based on the static data gathering wireless sensor networks and motivated by the idea of supply and demand network, a distributed algorithm is proposed in this paper to organize the sensor node into a balanced deal network that can balance the load of nodes. The network structure constructed by this approach is not a load-balancing tree, but a load-balancing network. Experimental results validate the effectiveness of this approach.

Key words: wireless sensor network; load-balancing tree; load-balancing network; data gathering; funneling effect

摘 要: 传感器网络所具有的集中式数据收集、多跳数据传输、多对一流量模式这 3 种特征会造成漏斗效应的出现,这会导致严重的包碰撞、网络拥塞、包丢失,甚至拥塞崩溃,还会导致能量消耗的热点的出现,使某些节点甚至整个网络过早死亡.负载平衡技术能够有效缓解漏斗效应的产生.针对静态数据收集传感器网络,基于供求网络的思想,提出了一种分布式算法,将传感器节点组织成交易平衡网络,用于平衡传感器节点的负载.利用这种方法组织而成的网络结构不是一棵负载平衡树,而是一个负载平衡网络.实验结果验证了这种方法的有效性.

关键词: 传感器网络;负载平衡树;负载平衡网络;数据收集;漏斗效应
中图法分类号: TP393 文献标识码: A

随着无线通信技术与微机电系统技术的快速发展,传感器网络的广泛部署已经成为可能.传感器网络具有

* Supported by the National Grand Fundamental Research 973 Program of China under Grant No.2006CB303000 (国家重点基础研究发展规划(973))

Received 2006-12-30; Accepted 2007-03-05

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

可靠、准确、灵活、低廉、易于部署等优良特性,使其具有广阔的应用前景[1,2],因此,传感器网络得到越来越多的关注,并有越来越多的研究人员参与到传感器网络的相关研究中来.

传感器网络的一项重要应用是监测应用,比如农田作物监测、建筑物健康监测、湖泊水质监测等[3,4].在这项应用中,节点需要每过一定时间间隔对被监测对象进行感知,并将所采集的数据以多跳的方式发送到基站上去.这种类型的传感器网络具有集中式数据收集、多跳数据传输、多对一流量模式 3 种特征,被称作数据收集传感器网络[5,6].

数据收集传感器网络的上述 3 个特征意味着越是靠近基站的节点,需要转发的数据包越多,其流量负担也越重,这可能会导致严重的包碰撞、网络拥塞、包丢失,在最严重的情况下甚至发生拥塞崩溃[7],这种现象叫做漏斗效应(funneling effect)[8].而节点间负载的不平衡会进一步加重漏斗效应的程度,造成能量消耗热点.负载过高的节点会因迅速消耗完它们的电能而过早死亡,这反过来也会使漏斗效应进一步恶化,而且可能使整个网络过早死亡或陷于瘫痪.

漏斗效应问题是传感器网络所固有的一个问题,研究者针对此问题已经提出了一些解决方法,比如分布式拥塞控制[7,8]、层次式网络设计[9]、数据融合[10,11]等.但正如文献[7,9]所指出的那样,这些方法都只能在一定程度上缓解漏斗效应.在传感器网络中,大部分包碰撞、网络拥塞、包丢失都发生在距离基站节点几跳的范围之内,仅仅依靠上述方法并不能彻底改善基站附近节点的瓶颈环境.

负载平衡也是一种有效缓解漏斗效应的技术.通过对节点特别是基站附件的节点进行负载平衡,可以在一定程度上防止包碰撞、网络拥塞、包丢失的发生,还可以平衡节点的能量消耗,延长传感器网络的生命周期.目前已有一些工作研究了传感器网络中的负载平衡问题.例如,Shah 等人在文献[12]中提出了一种具有能量感知能力的多路径路由机制来平衡节点之间的负载,但是他们所使用的传感器网络模型不是具有多对一流量特征的传感器网络模型;Perillo 等人在文献[13]中通过优化节点传输距离的方法来解决不平衡的负载分布,但是他们使用的传感器网络模型中的所有节点都可以与基站直接通信,这在大多数以多跳为特征的传感器网络中是不常见的;Gao 等人在文献[14]中讨论了分布在一条窄的带状区域内的传感器网络的负载平衡路由问题,并提出了 3 种贪婪算法以实现不同程度的负载平衡,但大多数传感器网络的分布并不是窄带状的,因此,这种方法同样具有很大的局限性;Gupta 等人在文献[15]中将节点组织成簇,并提出了一种在簇首间进行负载平衡的算法,但这种方法仅适用于簇集结构的传感器网络.

解决数据收集类型传感器网络负载不平衡问题的一种方法是把传感器节点组织成一种负载平衡树结构来实现负载平衡.在文献[16]中,Hsiao 等人为无线接入网络提出了一种负载平衡的路由算法,这种算法构造出的平衡树能够在最高层无线节点之间实现负载平衡.但传感器网络的流量特征不同于无线接入网络,因此,这种方法不适用于传感器网络.Dai 等人在文献[17]中设计了一种以节点为中心的集中式算法,用来把传感器网络构造成一棵静态负载平衡树,但这种算法所基于的网络是网格(grid)结构的传感器网络,这使得这种方法的适用范围不广.在许多情况下,仅仅构造一棵静态的负载平衡树并不能实现流量的平衡[18],这可以借助如图 1 所示的简单例子进行说明.可以为图 1 中的网络构建两棵负载平衡树,如图 1(a)与图 1(b)所示,但是,任何一棵树都不是一棵负载平衡树.为了解决此问题,在文献[18]中,Yang 等人提出了 DQEB(dynamic query-tree energy balancing)协议来调整树的结构,达到平衡节点间能量消耗的目的;文献[19,20]提出了类似的方法.在这些方法中,传感器网络的树结构是会发生改变的,这能够达到平衡流量的目的,但这是以调整树结构耗费能量作为代价的.

本文基于静态数据收集传感器网络,通过将节点组织成一个负载平衡的供求网络来解决网络的负载平衡问题.方法的思想可以借助图 1(c)来说明,由本文算法所构建的网络结构不是一棵平衡树,而是一个平衡网络.算法的基本思想是,将数据收集传感器网络看作是数据供需网络,基站是唯一的最终数据需求者,而传感器节点是数据生产者与运输者,数据需求者从生产者那里购买数据.本文提出一种分布式算法,在基站与节点以及节点与节点之间建立起平衡的供需关系,将基站与节点组织成一个负载平衡网络,从而可以在网络进行数据收集时平衡能量消耗,延长网络寿命,并防止网络拥塞的出现.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

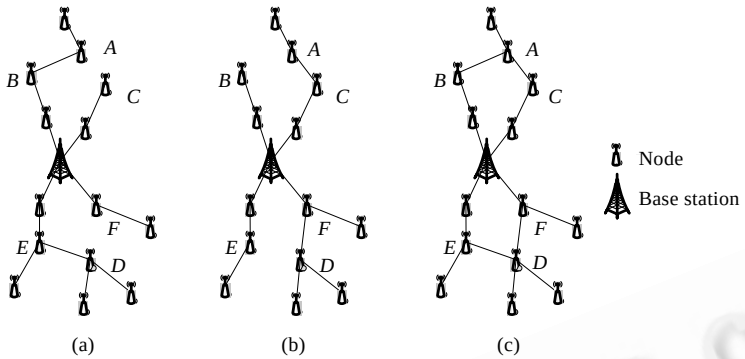


Fig.1 Load-Balancing trees and load-balancing network

图 1 负载平衡树与负载平衡网络

1 网络模型与方法预览

1.1 网络模型

本文的研究所依据的传感器网络是数据收集型传感器网络,这种网络广泛应用于各种监测领域.在这种网络中,节点需要定时地对被监测对象进行感知,并将所采集的数据发送到基站上.不失一般性,本文使用的网络模型基于如下的假设:

(1) 一个传感器网络由一个基站和分布于平面上的大量传感器节点组成的,每个节点都有唯一的标识.

(2) 传感器节点是能量受限的,而基站是能量不受限的.

(3) 所有传感器节点在部署之后不再移动,节点具有较低的失效率.网络具有比较稳定的拓扑结构.

(4) 网络以周期的方式工作,一个节点在一个周期内完成对被监测对象进行监测,并将所获得的数据包往基站发送.

1.2 方法预览

负载平衡网络的思想来自于市场供求网络,一个传感器网络可以被看作由一个购买者和许多生产者和运输者组成的网络.基站充当唯一的购买者,而传感器节点是生产者和运输者.基站与传感器节点被划分成不同的层次,基站位于第 0 层,传感器节点根据其到基站的最小跳数分属不同的层次.如果第 n+1 层的 j 节点能够与第 n 层的 i 节点直接通信,则称 j 为 i 的一个子节点;如果两个节点位于同一层次且可以相互通信,则称这两个节点为兄弟节点.

因为基站只能与其直接邻居节点即第 1 层节点进行通信,这些节点要为其他不能与基站直接通信的节点转发数据包,所以,这些节点的负载较之不能与基站直接通信的节点更重.在本文中,第 1 层节点称为关键节点;相应地,其他层次的节点称为非关键节点.本文提出的算法利用货币与产品消息,通过交易来建立负载平衡网络,基站只能与关键节点进行交易并向关键节点支付同样数量的货币.然后,关键节点利用从基站得到的货币与第 2 层子节点或第 1 层兄弟节点进行交易;接下来,第 n 层节点再与其第 n+1 层子节点或第 n 层兄弟节点进行交易.在进行交易时,采取适当的策略使每个子节点或兄弟节点获得同样数量的货币.采用这种方式,处于同一层次的节点得到同样数量的货币,这样,处于同一层次的节点的负载也就是平衡的.

虽然使用上面所述交易的方式来平衡能量消耗是可行的,但是,进行交易需要交换交易信息,这也会消耗能量.为了节省能量,让节点间形成固定的交易关系是合适的.这样,只是在将节点组织成平衡负责网络时需要交换交易信息,在负责平衡网络形成之后就不需要再交换交易信息.本文算法所构造的平衡交易网络就是节点间形成固定交易关系的网络,具有如下的特征:

(1) 任何一个非关键节点的负载小于任何一个关键节点的负载;

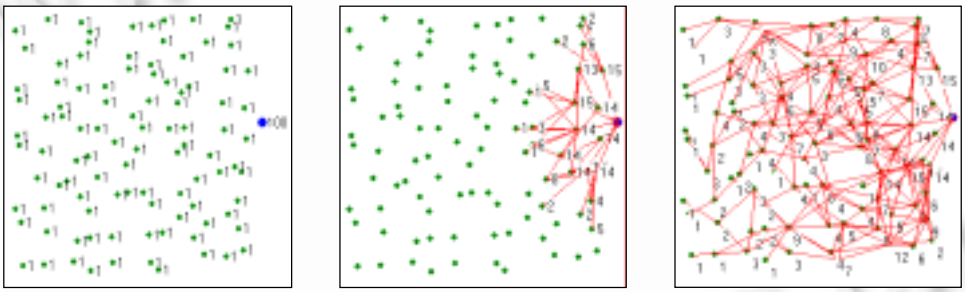
(2) 同一层次的节点的负载是近似平衡的;

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

(3) 一个子节点在收集或接收到一个数据包之后,以一定的概率随机地从父节点中选取一个作为数据包的下一跳目的节点.

特征(1)保证的是关键节点与非关键节点之间的负载平衡.在传感器网络中,关键节点除了需要传送自己收集的数据包到基站节点以外,还要承担转发其他非关键节点数据包到关键节点的任务,因此,关键节点往往要承担比非关键节点更重的任务.因为非关键节点不能与基站直接通信,所以非关键节点不能分担关键节点的负载.特征(1)可以保证任一关键节点的负载大于任一非关键节点的负载,关键节点将最快消耗完自己的能量.这样,在部署网络或者重新部署新节点时,就可以通过有目的地多部署关键节点的方式来延长网络的寿命.特征(2)保证了同一层次节点之间负载的近似平衡.仅仅具备特征(1)与特征(2)还不能够完全避免包碰撞的出现,比如对于一个父节点 p 的多个处于同一层次的子节点,这些子节点同时有数据包要发送,如果这些子节点同时选取 p 作为下一跳节点,则会导致碰撞的出现.特征(3)可以降低多个子节点同时选取同一父节点作为数据包下一跳节点的概率,从而可以降低碰撞的发生概率.

图 2 给出了负载平衡网络的构建实例.网络的初始状态如图 2(a)所示,每个节点被赋予 1 个产品,而基站被赋予与网络中节点数量相等的货币.接下来,算法从基站开始构建一个负载平衡网络.如图 2(b)所示,基站发送给每个关键节点一个货币消息,将数量为$\lfloor(n/c_n)\rfloor$或$\lceil(n/c_n)\rceil$的货币分配给每个关键节点,其中,n 是传感器网络中节点的数量,而 c_n 是关键节点的数量.关键节点收到货币消息后,将货币消息中携带的货币数量减 1,然后对剩余货币进行重新分配,也就是发送货币消息给其子节点或兄弟节点.最后,所有的节点将被组织成一个如图 2(c)所示的负载平衡网络.



(a) (b) (c)

Fig.2 An example of constructing a load-balancing network

图 2 负载平衡网络构建实例

2 算 法

本文提出的方法不仅适用于平面结构即无等级结构的传感器网络,而且适用于有等级结构的传感器网络(如簇集网络).本节首先介绍平面网络的负载平衡网络构建算法,然后介绍有等级网络的负载平衡网络构建算法.

2.1 平面型传感器网络算法

将一个平面型传感器网络组织成一个负载平衡网络需要两个步骤:第 1 步是对网络进行初始化,将节点组织成一个层次化网络;第 2 步是用一种分布式算法将第 1 步构造的层次化网络转变成一个负载平衡网络.然后,网络就可以开始工作,并利用所构造的负载平衡网络把所采集的数据发送到基站.

一个传感器网络可以被看作一个图 $G=(V,E,BS)$,其中,BS 表示基站,集合 $V\backslash\{BS\}$中的每一个元素代表一个传感器节点,如果节点 u 与节点 v 能够直接通信,则在集合 E 中包含一条边(u,v).算法的第 1 步是将基站与节点构建成一个层次化网络,为此,每个节点需要几个列表的支持:父节点列表 PL、子节点列表 CL、兄弟节点列表 SL 和邻居节点列表 NL.对于一个节点 u,其 4 个列表可以定义为:

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

$v\in PL$,若 $v\in V$ 且$(u,v)\in E$ 且 $h_u=h_v+1$;

$v\in CL$,若 $v\in V$ 且$(u,v)\in E$ 且 $h_u=h_v-1$;

$v\in SL$,若 $v\in V$ 且$(u,v)\in E$ 且 $h_u=h_v$;

$v\in NL$,若 $v\in V$ 且$(u,v)\in E$.

其中,v 是节点 u 的邻居节点,h_u 和 h_v 是节点 u,v 的跳数.节点 v 在这些列表中的成员具有如下结构:$\langle nodeID, moneyTo,moneyFrom,productTo,productFrom,isFull\rangle$,其中,*nodeID* 是相应节点的标识,*moneyTo* 表示节点 u 送到节点 v 的货币数量,*moneyFrom* 表示节点 u 从节点 v 收到的货币数量,*productTo* 表示节点 u 送到 v 的产品数量,*productFrom* 表示节点 u 从节点 v 收到的产品数量,*isFull* 表示节点 v 所收到的货币数量是否超过其上限.若节点 v 的 *isFull* 被设置为 True,则当节点 u 在分配货币时,将不再向节点 v 分配货币.

层次化传感器网络的构建如下所述.在节点被部署后,每个节点都设置自己的跳数为无穷.然后,每个节点发送广播通知其邻居节点报告其存在,这样,一个节点就可以知道其所有邻居节点,并将这些信息存储到 *NL* 列表之中.接着,基站将自己的跳数设置为 0,并向关键节点广播一个 *hello* 消息,消息中包含基站的跳数值.当一个节点 u 从节点 v 接收到一个 *hello* 消息后,从中得到跳数值 h_v,然后利用自己的跳数值 h_u 进行如下比较并执行相应操作:

(1) 若 $h_v=h_u$,则节点 u 将 v 添加到 *SL* 列表;

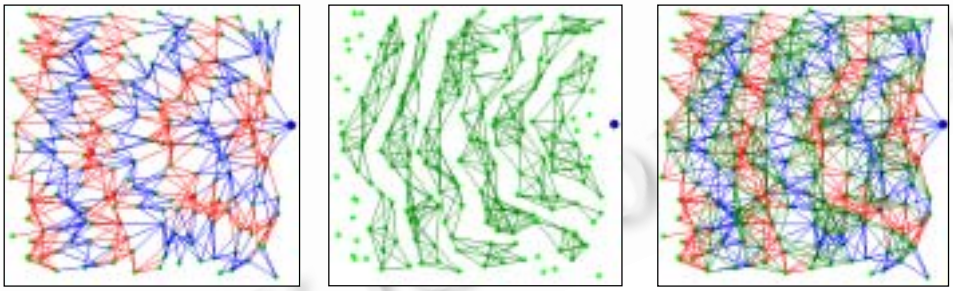
(2) 若 $h_v=h_u+1$,则节点 u 将 v 添加到 *CL* 列表;

(3) 若 $h_v>h_u-1$,则节点 u 无动作;

(4) 若 $h_v=h_u-1$,则节点 u 将 v 添加到 *PL* 列表;

(5) 若 $h_v<h_u-1$,节点 u 清空 *PL* 并将 v 添加到 *PL* 中,设置 $h_u=h_v+1$,并向邻居广播包含 h_u 的 *hello* 消息.

借助于广播 *hello* 消息,一个传感器网络就可以被组织成一个层次化网络.图 3 给出了一个层次化网络的例子,其中,父节点与子节点关系如图 3(a)所示,兄弟关系如图 3(b)所示,图 3(c)是图 3(a)和图 3(b)合并的结果.基站没有父节点,而叶节点没有子节点.



(a) (b) (c)

Fig.3 Hierarchical sensor networks

图 3 层次化传感器网络

2.2 构建负载平衡网络

算法使用 5 种消息:*hello,count,register,money* 和 *deal* 来构建一个负载平衡网络.一个消息被定义为 $\langle msgType,senderID,values,upperBound,isReturn\rangle$,其中,*msgType* 可以是 *mtHello,mtCount,mtRegister,mtMoney* 或者 *mtDeal*;*senderID* 是发送此消息的节点 ID;*values* 在 *msgType* 是 *mtHello* 的情况下表示跳数,在 *msgType* 是 *mtMoney* 的情况下为接收节点 ID 与货币数列表,而当 *msgType* 是 *mtDeal* 时为接收节点 ID 与产品数.*upperBound* 用来防止一个非关键节点的负载超过关键节点的负载.当一个节点无法提供产品时,将源节点发送来的货币返回,*isReturn* 用来指示消息中的货币是否为从子节点或兄弟节点返回的货币.如果一个节点 u 从节点 v 收到 *isReturn* 被设置为 True 的货币消息,则将相应列表中 v 节点对应的记录的 *isFull* 属性设置为 True.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

基站首先需要知道网络中节点的数量,为此,基站广播一个计数消息给所有的节点,一个节点在收到此消息后将其一个变量 *product* 设置为 1,*product* 表示节点在一个数据周期内所产生的产品的数量.同时,将其他两个变量: *moneyTotal* 与 *moneyAccept* 设置为 0,*moneyTotal* 与 *moneyAccept* 分别表示节点已经收到的总货币数量与总货币数量中未完成交易的货币数量.然后,节点返回一个携带本身标识的 *register* 消息给基站.在 *register* 消息传送过程中,还可以使用数据聚集技术 go 减少数据传送量.基站通过统计所收到的 *register* 消息中节点的数量,就可以知道网络中节点的数量.

在基站得到节点的数量之后,基站发送一个 *money* 消息给每一个关键节点,其中包含的货币值 m_n 采用如下方式计算:设 n 为传感器节点的数量,c_n 为关键节点的数量.如果 n 恰好能够整除 c_n,则 $m_n=n/c_n$;否则,m_n 在$\lfloor(n/c_n)\rfloor$和$\lceil(n/c_n)\rceil$二者之中随机地选择一个.

一个节点 u 维护两个列表:*moneyList* 和 *dealList*.*moneyList* 用于存储节点 u 接收到的货币,而 *dealList* 用于存储节点 u 进行或者收到的交易.当节点 u 从节点 v 收到一个 *money* 消息后,执行如图 4 所示的操作.

```
void HandleMoneyMsg(TWSNMsg msg)
{
    int v=msg.senderID;
    if (v in PL) or ((v in SL) and (msg.isReturn==False) {
        if (msg.upperBound<=moneyTotal) {
            send all money back to v;
            return;
        }
        if (msg.upperBound−moneyTotal−msg.value)<0 {
            send excessive money back to v;
            add a money record into moneyList;
        }
        else
            add a money record into moneyList;
        if product==1 {
            product=0;
            send deal message to v;
            add a deal record into dealList;
        }
        return;
    }
    if (v in CL) or ((v in SL) and (msg.isReturn==True) {
        set isFull of record v as True;
        if (moneyAccept>0) and (ifFull field of some children or siblings==False)
            distribute the money to children and siblings;
        else {
            send the money back to parents or siblings;
            delete the corresponding record from moneyList;
        }
    }
}
```

Fig.4 Handling of the *money* message

图 4 对 *money* 消息的处理

首先判断 *money* 消息的来源,如果消息来自某个父节点或者来自某个兄弟节点且消息的 *isReturn* 属性为 False,表明是新收到的货币,则节点判断是否所收到的货币已经超过上限:如果超过,则将货币全部返回;否则,根据情况接收部分货币或全部接收,并向 *moneyList* 中添加一条记录.接下来判断 *product* 是否为 1,如果为 1,则进行交易并发送交易消息到节点 v,并添加一条交易记录到 *dealList*.另一方面,如果 *money* 消息来自某个子节点或者来自某个兄弟节点且 *isReturn* 属性为 True,表明是返回的货币,则将节点 v 记录的 *isFull* 属性设置为 True,接着判断是否还有子节点或兄弟节点记录的 *isFull* 属性为假,若有,则将 *money* 分配到这些节点;否则,根据 *moneyList* 记录将 *money* 返回到父节点或兄弟节点,并删除相应记录.为了减少消息发送的数量,*money* 消息以广

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

播的方式发送,节点 u 在一个周期内接收所有邻居节点发给自己的 *money* 消息,进行处理后,在下一个周期内广播处理结果.

在一个节点分配 *money* 时,若仅仅把子节点作为分配目标,则最后形成的网络结构是一棵负载平衡树.如前文所述,在许多情况下,树状结构不能实现负载的平衡.在如图 4 所示的算法中,节点在分配 *money* 时不仅仅把子节点作为分配目标,兄弟节点也同样作为分配目标,在分配时遵循公平分配的原则,并借助 *upperBound* 变量,使得同一层次的节点所收到的货币近似平均,且不会有非关键节点所获得的货币超过关键节点.算法最后形成的网络结构是一个负载平衡网络.负载平衡网络可以解决负载平衡树在许多情况下所不能解决的负载平衡问题,这也正是负载平衡网络方法比平衡树方法优越之处.

在节点 u 从节点 v 收到一个 *deal* 消息后,执行如图 5 所示的操作.

```
void HandleDealMsg(TWSNMsg msg)
{
    v=FindNode(msg.senderID);
    v.productFrom++;
    if (this!=BS) {
        rec=Find the oldest money record;
        node=FindNode(rec.nodeID);
        send a deal message to node;
        node.productTo=node.productTo+1;
    }
}
```

Fig.5 Handling of the *deal* message

图 5 对 *deal* 消息的处理

在算法执行完毕后,每个节点 u 的 PL,CL 与 SL 列表保存了交易的信息,节点 u 整理这些信息并生成一个如图 6 所示的列表,其中每一项与一个父节点或兄弟节点对应,包含一个百分比数值,表示当节点 u 收到一个数据包时,将数据包发送到这个父节点的比率.假设节点 u 的 PL,SL 所包含节点的集合为$\{N_1,N_2,\ldots,N_m\}$,节点 u 从$\{N_1,N_2,\ldots,N_m\}$所收到的货币数量为$\{M_1,M_2,\ldots,M_m\}$,则 u 的一个父节点或兄弟节点 N_i 所对应的比率 P_i 的计算公式为 $P_i=\dfrac{M_i}{\sum_{j=1}^{m}M_j}$.

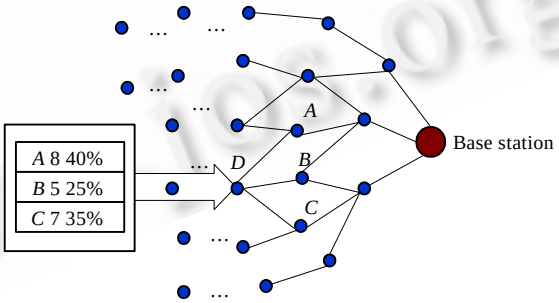


Fig.6 The final result of algorithm

图 6 算法最终结果

算法执行的过程相当于对传感器网络使用 *money* 消息进行多路并行遍历节点的过程,当每个节点都被 *money* 消息遍历到时,负载平衡网络就建立起来了.在最坏情况下,网络中的每条边都要被遍历才能够遍历所有节点,因此,算法的复杂度为 $O(|E|)$.可见,算法的代价是比较高的.

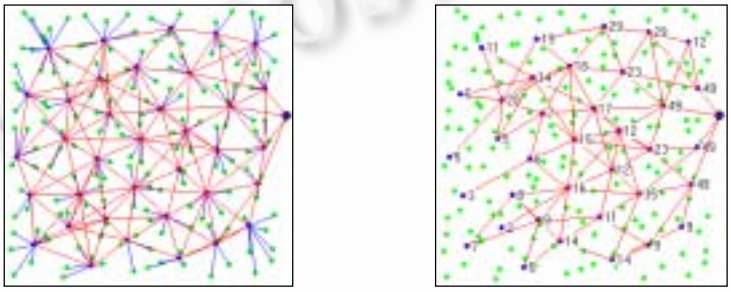
2.3 有等级网络的负载平衡网络构建算法

平面型结构是一种缺乏扩展性的结构,只适用于规模较小的传感器网络.对于大规模的传感器网络,将节点

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

组织成等级结构是解决扩展性问题的有效方式.将传感器节点组织成等级结构有很多的优势,比如,等级结构可以更有效地利用稀缺资源,如无线带宽等[21].本文的方法也适用于有等级的传感器网络,比如基于簇集的传感器网络.在一个基于簇集的传感器网络中,簇首因为要为簇成员转发数据,所以其负载是非常重的.而其中某些簇首不仅要为本簇成员转发数据,还要为其他簇首转发数据,因此,这些簇首的负载就更重.在某些情况下,负载过度严重的簇首可能很快耗尽其能量而死亡.所以,对于簇首的负载平衡是非常有必要的.

如何将传感器节点组织成簇这个问题不在本文的研究范围之内,已经有一些文献对此进行了研究[22,23].本文假设节点已经被组织成簇,且簇首已经被选出.为簇集网络构建负载平衡网络的方法类似于平面网络的方法,其差别仅在于簇集网络中负载平衡网络是由簇首组成的.如同平面网络,基站与簇首首先组织成一个层次式网络;然后,每个簇首对本簇的成员进行计数并保留此数值.基站通过发送 *count* 消息给簇首得到网络中节点的数量.接下来的操作类似于平面传感器网络,基站发送包含相应货币数量的 *money* 消息给每个直接簇首邻居;每个簇首在收到 *money* 消息后进行交易,并把剩余货币重新分配到相应簇首.这样,通过 *money* 消息与 *deal* 消息的交换就可以在簇首之间构建出负载平衡网络.图 7 给出了簇集网络负载平衡网络的一个例子,图 7(a)是构建负载平衡网络之前的网络,图 7(b)是构建好的负载平衡网络.



(a) (b)

Fig.7 Load-Balancing network of a hierarchical sensor network

图 7 层次结构传感器网络的负载平衡网络

当一个簇集网络工作时,一个簇成员节点将所采集的数据发送到簇首,簇首在收到数据包后,根据其交易列表所得出的比率决定将数据包发送到哪一个父簇首.

3 实验结果

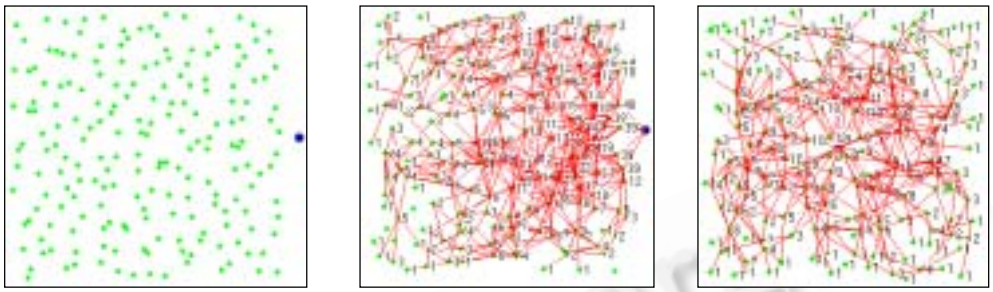
本节通过仿真实验验证负载平衡网络能够延长传感器网络的寿命,并能防止网络中的流量拥塞.实验所用的仿真程序是使用 VC++开发的.如图 8(a)所示,实验所使用的传感器网络包含 200 个节点,均匀分布在面积为 $300\times300\text{m}^2$ 的正方形平面上.所有节点的通信距离都为 50m,节点的初始能量为 50J,基站的能量是无限的.节点要求每过一定时间间隔采集一次数据,并将数据发送到基站.节点用于感知、收集与传送一个数据包所耗费的能量分别为 2×10^{-5}J,2×10^{-5}J 和 1×10^{-4}J.图 8(b)与图 8(c)分别给出了当基站位于网络区域边缘与网络区域中心时,利用算法所构建的负载平衡网络,即实验分别使用这两类网络来验证各种负载平衡方法所构造出的负载平衡网络的性能.

实验使用两个性能衡量标准,即网络寿命和负载最大节点的平均流量来衡量网络的性能.网络寿命定义为从传感器网络开始工作到第 1 个节点消耗完自己能量所经历的时间间隔,网络寿命越长,性能越高.负载最大节点的平均流量用来衡量网络数据流的拥塞程度,这个值越高,网络所发生的拥塞情况越严重.

实验比较 4 种方法.(1) 能量最小路由方法 MESA(most energy saving approach).在这种方法中,每个节点利用一条能量消耗最少的路径将数据包发送到基站.这种方法在一个数据收集周期中所消耗的总能量是最少的.(2) 静态负载平衡树方法 SLBT(static load-balancing tree),节点被组成一棵负载平衡树,作为路由将数据包发送到基站.构造 SLBT 所使用的算法基于文献[17]中所提出的算法,树的结构在数据收集过程中不发生改变.(3) 动

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

态负载平衡树方法 DLBT(dynamic load-balancing tree),节点使用动态负载平衡树将数据包发送到基站.构建 DLBT 的算法基于文献[18]所提出的算法,在数据收集过程中,节点之间要交换剩余能量信息,并根据情况调整树的结构.(4) 本文提出的负载平衡网络方法 LBN(load-balancing network).



(a) (b) (c)

Fig.8 Sensor networks used in the experiments

图 8 实验所用的传感器网络

对于基站位于网络区域边缘与位于网络区域中央的两类传感器网络,分布随机产生 20 个传感器网络,使用 6 种数据采集时间间隔:10,20,30,40,50,60 秒.对于每个数据采样间隔,通过平均 20 个同类传感器网络的寿命与负载最重节点的流量,得到一类网络在这个间隔下的平均寿命与拥塞度.

图 9 与图 10 给出了使用基站位于网络区域边缘的传感器网络进行实验所得到的实验结果.图 9 给出了 4 种方法所构建网络的网络寿命对比.从图中可以看出,网络寿命随着数据采集间隔的增大而增大;LBN 方法所构造的网络在所有数据采集间隔下都具有最长的网络寿命.图 10 给出了 4 种方法的最大负载节点的平均流量对比.可以看出,平均流量随着数据采集率的下降而下降,而 LBN 方法所构建的网络在所有数据采集率下都取得最小的平均流量.在实验中观察到,4 种网络死亡原因都是因为有关键节点首先消耗完能量.在使用 MESA 方法收集数据时,虽然在一个数据收集周期内所消耗的能量最少,但是却会在关键节点处造成严重的负载不平衡,某些负载重的关键节点会很快消耗完能量从而导致网络死亡.SLBT 在一定程度上可以平衡关键节点的负载,因此,SLBT 的性能比 MESA 要好.实验表明,SLBT 在节点最大通信距离较大的情况下具有较好的性能,但在许多情况下,尤其是在节点最大通信距离较小的情况下,平衡关键节点负载的能力是有限的.借助于在数据收集过程中对网络结构进行挑战,DLBT 可以取得比 SLBT 更好的性能,但在调整树结构过程中需要交换数据包,这又引入了新的网络流量,从总体上加重了关键节点的负载.LBN 借助于在兄弟节点之间进行数据转发,可以取得与 DLBT 一样的对关键节点负载平衡的效果,而不需要进行数据交换,因此性能最佳.

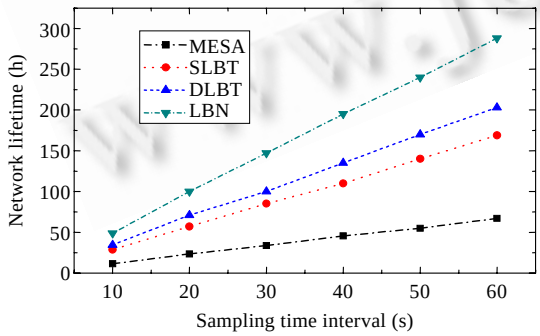


Fig.9 Lifetime of WSNs that BS locate at the network area border

图 9 基站位于网络区域边缘的传感器网络寿命

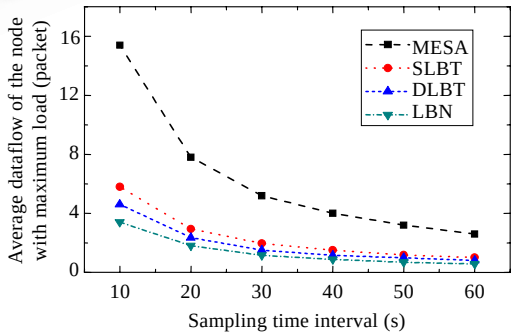


Fig.10 Traffic of WSNs that BS locate at the network area border

图 10 基站位于网络区域边缘的传感器网络流量

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

图 11 和图 12 给出了使用基站位于网络区域中央的传感器网络进行实验的实验结果,两图分别给出了 4 种方法的网络寿命与最大负载节点平均流量对比.对比两类网络的实验结果可知,4 种方法在两类网络中的性能表现是类似的,网络寿命随着数据采集间隔的增大而增大,而最大负载节点平均流量随着数据采集间隔的增大而下降.在两种网络中,LBN 方法所构建的网络都有最长的网络寿命与最低的网络拥塞.相比而言,基站位于网络区域中央的网络有较长的网络寿命与较低的网络拥塞,这是因为这类网络的基站有更多的关键节点可以分担并转发非关键节点的数据包,从而有较长的网络寿命与较低的网络拥塞.

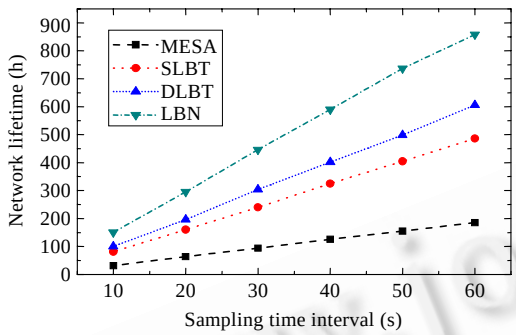


Fig.11 Lifetime of WSNs that BS locate at the network area center

图 11 基站位于网络区域中央的传感器网络寿命

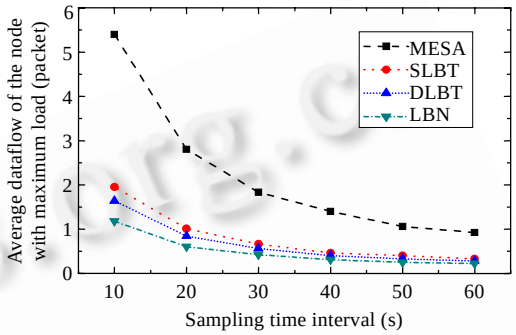


Fig.12 Traffic of WSNs that BS locate at the network area center

图 12 基站位于网络区域中央的传感器网络流量

4 讨 论

上文所提出的负载平衡网络构建方法是针对静态数据收集网络提出的,该方法所基于的假设是网络的拓扑结构不会频繁发生变化.对于可能出现的动态性,如通信链路出现短暂中断,节点可以通过暂存数据或者使用其他链路转发数据,并在其后进行补偿的方法使节点负载得以平衡.对于可能出现的节点故障,则可以通过在故障发生后重建负载平衡网络来应对.对于动态性较低的传感器网络,负载平衡网络方法是有效的.

但在实际应用中,许多传感器网络具有很强的动态特性,网络的拓扑结构可能因为节点故障、无线链路变化、网络移动性等原因而频繁发生变化.对于这种网络,通过暂存数据或暂借其他链路转发数据其后加以补偿的方法是无效的.而若采用重建的方法,则因为每次构建负载平衡网络需要消耗较大的代价而又是不可行的.因此,负载平衡网络方法不适用于动态性较强的传感器网络.

5 结束语

传感器网络具有集中式数据收集、多跳数据传输、多对一流量模式 3 个特征,使得漏斗效应成为传感器网络中的一个固有问题.负载平衡能够缓解漏斗效应的发生.本文针对静态数据收集传感器网络,基于供求网络的思想提出了一种分布式算法,将传感器节点组织成交易平衡网络,用于平衡传感器节点的负载.利用这种方法组织而成的网络结构不是一棵负载平衡树,而是一个负载平衡网络.实验表明,本文方法所生成的负载平衡网络能够延长网络的寿命并降低网络的拥塞.

本文方法所构建的交易平衡网络是静态的.这种方法对于动态性较低的传感器网络是有效的,但不适用于动态性较强的传感器网络.对于动态性较强的传感器网络,下一步的工作是研究利用动态交易平衡网络来解决这种网络的漏斗效应问题与负载平衡问题.另一方面,使用多个基站是解决漏斗效应问题的一种有效方法,具有多个基站的传感器网络的负载平衡网络构建方法是我们下一步研究的另一个方向.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

References:

[1] Akyildiz IF, Su W, Sankarasubramaniam Y, Cayirci E. Wireless sensor networks: A survey. Computer Networks, 2002,38(4): 393−422.

[2] Li JZ, Li JB, Shi SF. Concepts, issues and advance of sensor networks and data management of sensor networks. Journal of Software, 2003,14(10):1717−1727 (in Chinese with English abstract). http://www.jos.org.cn/1000-9825/14/1717.htm

[3] Cui L, Ju HL, Miao Y, Li TP, Liu W, Zhao Z. Overview of wireless sensor networks. Journal of Computer Research and Development, 2005,42(1):163−174 (in Chinese with English abstract).

[4] Ren FY, Huang HN, Lin C. Wireless sensor networks. Journal of Software, 2003,14(7):1282−1291 (in Chinese with English abstract). http://www.jos.org.cn/1000-9825/14/1282.htm

[5] Sun LM, Li JZ, Chen Y, Zhu HS. Wireless Sensor Networks. Beijing: Tsinghua University Press, 2005. 9−14 (in Chinese).

[6] Lindsey S, Raghavendra C, Sivalingam K. Data gathering in sensor networks using the energy-delay metric. IEEE Trans. on Parallel and Distributive Systems, Special Issue on Mobile Computing, 2002,13(9):924−935.

[7] Hull B, Jamieson K, Balakrishnan H. Mitigating congestion in wireless sensor networks. In: Stankovic JA, Arora A, Govindan R, eds. Proc. of the 2nd ACM Conf. on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys). Baltimore: ACM Press, 2004. 134−147.

[8] Ee CT, Bajcsy R. Congestion control and fairness for many-to-one routing in sensor networks. In: Stankovic JA, Arora A, Govindan R, eds. Proc. of the 2nd ACM Conf. on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys). Baltimore: ACM Press, 2004. 148−161.

[9] Wan CY, Eisenman SE, Campbell AT, Crowcroft J. Siphon: Overload traffic management using multi-radio virtual sinks. In: Redi J, Balakrishnan H, Zhao F, eds. Proc. of the 3rd ACM Conf. on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys). San Diego: ACM Press, 2005. 116−129.

[10] Petrovic D, Shah RC, Ramchandran K, Rabaey J. Data funnelling: Routing with aggregation and compression for wireless sensor networks. In: Akyildiz F, Li Y, Svakumar R, eds. Proc. of the 1st IEEE Int'l Workshop on Sensor Network Protocols and Applications. Piscataway: IEEE Press, 2003. 156−162.

[11] Shrivastava N, Buragohain C, Agrawat D, Suri S. Medians and beyond: New aggregation techniques for sensor networks. In: Stankovic JA, Arora A, Govindan R, eds. Proc. of the 2nd ACM Conf. on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys). Baltimore: ACM Press, 2004. 239−249.

[12] Shah RC, Rabaey JM. Energy aware routing for low energy ad hoc sensor networks. In: Proc. of the 3rd IEEE Wireless Communications and Networking Conf. (WCNC). Orlando: IEEE Press, 2002. 151−165. http://bwrc.eecs.berkeley.edu/Publications/2002/presentations/WCNC2002/wcnc.rahul.pdf

[13] Perillo M, Zhao C, Heinzelman W. On the problem of unbalanced load distribution in wireless sensor networks. In: Regency H, ed. Proc. of the IEEE GLOBECOM Workshops on Wireless Ad Hoc and Sensor Networks. Dallas: IEEE Press, 2004. 74−79.

[14] Gao J, Zhang L. Load balanced short path routing in wireless networks. In: Proc. of the 20th Annual Joint Conf. of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM). Hong Kong: IEEE Press, 2004. 1098−1107. http://www.ieee-infocom.org/2004/papers/23_2.pdf

[15] Gupta G, Younis M. Performance evaluation of load-balanced clustering of wireless sensor networks. In: Proc. of the 10th Int'l Conf. on Telecommunications (ICT). IEEE Press, 2003. 1577−1583. http://www.csee.umbc.edu/~younis/Publications/ICT2003/Gupta_Younis_ICT2003_Final.pdf

[16] Hsiao PH, Hwang A, Kung HT, Vlah D. Load-Balancing routing for wireless access networks. In: Bauer F, Cavendish D, eds. Proc. of the 20th Annual Joint Conf. of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM). Anchorage: IEEE Press, 2001. 986−995.

[17] Dai H, Han R. A node-centric load balancing algorithm for wireless sensor networks. In: Proc. of the Global Telecommunications Conf. (GLOBECOM). San Francisco: IEEE Press, 2003. 548−552. http://mantis.cs.colorado.edu/media/loadbalance.pdf

[18] Yang H, Ye F, Sikdar B. A dynamic query-tree energy balancing protocol for sensor networks. In: Proc. of the IEEE Wireless Communications and Networking Conf. (WCNC). Atlanta: IEEE Press, 2004. 1715−1720. http://networks.ecse.rpi.edu/%7Ebsikdar/papers/wcnc04.pdf

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

[19] Kakiuchi H. Dynamic load balancing in sensor networks. Technical Report, Stanford University, 2004. http://dbpubs.stanford.edu:8090/pub/2004-30

[20] Yan TX, Bi YZ, Sun LM, Zhu HS. Probability based dynamic load-balancing tree algorithm for wireless sensor networks. In: Lu XC, Zhao W, eds. Proc. of the Int'l Conf. on Computer Network and Mobile Computing 2005. Berlin: Springer-Verlag, 2005. 682−691.

[21] Zhao F, Guibas L. Wireless Sensor Networks: An Information Processing Approach. Boston: Elsevier-Morgan Kaufmann Publishers, 2004.

[22] Younis O, Fahmy S, HEED: A hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for ad-hoc sensor networks. IEEE Trans. on Mobile Computing, 2004,3(4):366−379.

[23] Ye M, Li CF, Chen GH, Wu J. EECS: An energy efficient clustering scheme in wireless sensor networks. In: Dahlberg T, Oliver R, Sen A, Xue GL, eds. Proc. of the IEEE Int'l Performance Computing and Communications Conf. New York: IEEE Press, 2005. 535−540.

附中文参考文献:

[2] 李建中,李金宝,石胜飞.传感器网络与感知数据管理的概念、问题与研究进展.软件学报,2003,14(10):1717−1727. http://www.jos.org.cn/1000-9825/14/1717.htm

[3] 崔莉,鞠海玲,苗勇,李天璞,刘巍,赵泽.无线传感器网络研究进展.计算机研究与发展,2005,42(1):163−174.

[4] 任丰原,黄海宁,林闯.无线传感器网络.软件学报,2003,14(7):1282−1291. http://www.jos.org.cn/1000-9825/14/1282.htm

[5] 孙利民,李建中,陈渝,朱红松.无线传感器网络.北京:清华大学出版社,2005.9−14.

张重庆(1974－),男,山东寿光人,博士生,主要研究领域为传感器网络,无线自组织网络.

伍民友(1954－),男,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为并行计算,无线自组织网络,传感器网络.

李明禄(1965－),男,博士,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为网格计算,传感器网络.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn