ISSN 1000-9825, CODEN RUXUEW
Journal of Software, Vol.18, No.5, May 2007, pp.1173−1185
DOI: 10.1360/jos181173
© 2007 by *Journal of Software*. All rights reserved.

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

传感器网络中基于环的负载平衡数据存储方法*

李贵林+, 高 宏

(哈尔滨工业大学 计算机科学与技术学院,黑龙江 哈尔滨 150001)

A Load Balance Data Storage Method Based on Ring for Sensor Networks

LI Gui-Lin+, GAO Hong

(School of Computer Science and Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

+ Corresponding author: Phn: +86-451-86415872, E-mail: liguilin@hit.edu.cn, http://db.cs.hit.edu.cn

Li GL, Gao H. A load balance data storage method based on ring for sensor networks. *Journal of Software*, 2007,18(5):1173−1185. http://www.jos.org.cn/1000-9825/18/1173.htm

Abstract: The traditional data centric storage method has a serious problem named hotspot problem, which appears near the sink and home node. Hotspot problem causes the nodes near the hotspot consume much more energy than other nodes, which seriously shortens the lifetime of the sensor networks. In this paper, a method distributing multiple sink nodes around the sensor networks is proposed to solve the hotspot problem around the sink. A load balance data storage method based on ring and a query processing algorithm for such a kind of data storage method are proposed to solve the hotspot problem around the home node. First, the ring based load balance data storage method divides the sensor networks into a lot of rings and stores data among all nodes within a ring. Second, different rings alternatively work during the working time of the network, which avoids the hotspot problem further. Finally, the query processing algorithm based on the load balance data storage method makes all nodes within a ring cooperatively answer the user's query. Although the ring based load balance data storage method and the query processing algorithm consume more energy than the traditional method when answering a user's query, the method makes all nodes within the network consume energy evenly, which avoids the hotspot problem of the traditional method, so the lifetime of sensor networks can be extended. Experimental results also show that the ring based load balance data storage method and the query processing algorithm can solve the hotspot problem and prolong the lifetime of the sensor networks.

Key words: hotspot problem; load balance; data centric storage; query processing; sensor network

* Supported by the Key Program of National Natural Science Foundation of China under Grant No.60533110 (国家自然科学基金重点项目); the National Natural Science Foundation of China under Grant No.60473075 (国家自然科学基金); the National Grand Fundamental Research 973 Program of China under Grant No.2006CB303000 (国家重点基础研究发展计划(973)); the Program for New Century Excellent Talents in University of China under Grant No.NCET-05-0333 (新世纪优秀人才支持计划); the Key Program of the Natural Science Foundation of Heilongjiang Province of China under Grant No.ZJG03-05 (黑龙江省自然科学基金重点项目); the Heilongjiang Province Scientific and Technological Special Fund for Young Scholars of China under Grant No.QC06C033 (黑龙江省青年科技专项资金)

Received 2006-12-31; Accepted 2007-03-05

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

摘 要: 传统的以数据为中心的存储方法有一个非常严重的缺点:网络中存在着明显的热点区域,主要出现在 sink 和 home 节点周围.位于热点区域附近的节点所消耗的能量远大于网络内的其他节点,从而严重缩短了传感器网络的寿命.对于出现在 sink 周围的热点问题,采用在网络中分布多个 sink 节点的方式消除热点.对于出现在 home 节点周围的热点问题,提出基于环的负载平衡数据存储协议,并以此数据存储为基础,给出相应的查询处理算法消除热点.首先,负载平衡数据存储协议将传感器网络划分为多个环,在网络工作的某个时间段内,数据被分散存储在某个环内的多个节点上;其次,该存储结构的最大特点是,在不同时间段内,各环轮换工作进一步消除热点.最后,基于环的查询处理算法也是由环内的多个节点协作完成.基于环的负载平衡数据存储协议以及基于此存储协议的查询处理算法虽然在查询处理中所消耗的能量高于传统方法,但可以保证从数据存储到查询处理的整个过程中,网络的所有节点均匀地消耗能量,从而避免了传统方法中的热点问题,达到延长网络寿命的目的.实验表明,基于环的数据存储及查询处理算法可以解决传统上基于事件存储协议中出现的热点问题,并延长传感器网络的寿命.

关键词: 热点问题;负载平衡;以数据为中心的存储;查询处理;传感器网络
中图法分类号: TP393 文献标识码: A

当前,无线传感器网络已应用到许多领域,并被视为一种新型的数据库[1−3].对这一新型的数据库,人们给出了许多查询类型,其中,基于事件的查询[4,5]是一类很重要的查询类型.人们针对此类查询开展了许多研究工作[4−12],主要通过以数据为中心的存储方法[4,5]处理基于事件的查询.该方法的主要思路是,用户定义一些感兴趣的事件.当传感器观测到这些事件后,利用系统定义的散列函数将事件名散列到网络内的一个地理位置,并将关于此事件的数据保存于距离散列位置最近的节点(称该节点为 home 节点[4,5]).用户提出的关于此事件的查询也被相同的散列函数散列到相同的位置,得到查询结果.基于上述思想,人们网络存储方面进行了深入的研究工作,主要包括:文献[6]提出了一个改进的 DCS 存储策略(resilient data-centric storage),降低了节点的平均存储代价及获取数据的平均通信代价;文献[7,8]提出了一个称为维(dimensions)的层次体系存储结构,这种层次结构适合于下钻(drill down)等 OLAP(on line analytical processing)操作;文献[9]给出了一种称为 DIFS(distributed index for features in sensor networks)的分布式索引方法,能量有效地处理区域查询;文献[10]提出了一个称为 DIM(distributed index for multi-dimensional data)的能够支持多维属性区域查询的空间索引结构;文献[11]讨论了基于数据存储的时空查询处理方法,该方法以能量节省的方式来回答时空查询.但是,上述文献存在一个共同的缺点:将数据存储到网络中的少数节点上,因而无法解决由此产生的热点问题.文献[12]提出了一种基于环的索引方法,初步讨论了应用文献[4,5]的方法可能产生的热点问题.但该方法存在的主要问题是,存储数据的环不能实现轮换工作,这样也会在环上的节点周围产生热点现象,影响网络寿命.由此可见,热点问题是基于数据存储方法所必须解决的问题.

通过分析传统的以数据为中心的存储方法的工作过程可见,该方法最大的问题是在 home 节点周围出现热点的问题.而产生该热点问题的主要原因是将事件存储和查询处理都集中到少数 home 节点上.本文提出一种以数据为中心的、基于环的负载平衡数据存储协议,并在此基础上建立查询处理算法,可以很好地解决传统方法中出现的热点问题.该存储和查询算法的主要思路是,使传感器网络中的每个节点都负责对事件的存储及对用户查询作出响应.具体地,传感器网络被分成多个环形区域,每个环都存在一定的“活动时间”.环上各节点仅在活动时间内负责传感器网络内的事件存储和查询处理.通过各个环间的轮换处于活动状态,实现不同节点间能量的均匀消耗.在某个环的活动时间内,负载平衡数据存储协议将事件存储在网络当前处于活动状态的环形区域内的各个节点上,查询也由环上的所有节点共同回答.由此可见,每个环的活动时间是一个非常重要的参数.本文利用线性规划方法对传感器网络的寿命建模,讨论要使网络寿命最长,各个环的活动时间.

网络中另一个容易产生热点问题的区域是 sink 节点的周围.与传统的单 sink 网络设置不同,本文采用设置多个 sink 节点及查询处理网络内部执行的方法消除单 sink 网络的热点问题.但设置多个 sink 节点无法改变传统数据存储方法中 home 节点面临的热点问题.因为网络中的任何节点在发现用户感兴趣的事件后都会向 home 节点传递数据,用户对该事件的查询也会向 home 节点传递,故仍会在 home 节点周围出现热点.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

综上所述,本文分别从数据存储和查询处理两个角度考虑避免网络中的 home 节点和 sink 节点周围产生的热点问题:首先,基于环的负载平衡数据存储协议通过将事件存储和查询处理分散在环内的多个节点,并采用多个环按照一定的时间轮换工作的方式平衡网络内不同节点的负载,避免 home 节点周围出现热点问题;其次,采用设置多个 sink 节点的方法可以有效地分散观测数据和用户查询对 sink 的压力,基于环的查询处理方法使用户查询可以在网络内部执行,进一步减小观测数据对 sink 的压力,从而解决 sink 周围出现的热点问题.

本文以基于事件的近期区域查询为背景,介绍基于环的负载平衡数据存储协议及查询处理方法.基于事件的近期区域查询是传感器网络中的一类很重要的查询.它是指用户对传感器网络中某个区域内近期发生某类事件数量提出的查询.例如,在火情检测应用中,用户往往需要知道当前火场某区域内温度超过某一阈值的位置数量,并根据该数值的大小决定消防员及车辆的需求;再如,在动物保护应用中,科学家需要根据保护区范围内观测到被保护动物区域的多少来确定开展动物保护以来所取得的效果.这里需要对“近期”性做进一步说明:首先,考虑到单个传感器的存储容量都非常有限,故只能对网络内近期发生的事件进行保存;其次,在实际应用中,用户往往只关心网络在最近时间段内发生的事件,故无须保存过多的历史数据;最后,即使 home 节点保存的只是近期数据,也同样需要考虑热点问题.因为在传统方法中,即使 home 节点仅保存近期数据,但它并不能改变网络中所有关于该事件的数据向 home 节点保存的事实,从而也会在 home 节点周围形成热点.本文提出的数据存储方法可以很好地支持近期区域查询,并使网络寿命最大.对于其他类型的基于事件的查询,本文提出的数据存储和查询处理算法也具有很好的适应性.对于用户提出的不同类型的基于事件的查询,各个传感器也只需返回对应的结果数据包,而无须改变本文提出的存储和查询处理算法的基本思想.

本文第 1 节介绍预备知识.第 2 节介绍基于环的负载平衡数据存储协议及查询处理算法的工作过程.第 3 节分析理想情况下,使网络寿命最长,各个环的活动时间.第 4 节给出一般条件下各环活动时间的设定方法.第 5 节通过实验将本文提出的方法与传统方法进行比较.最后给出结论.

1 预备知识

为了方便对基于环的负载平衡数据存储协议的解释,本文首先假设传感器网络分布在一个圆形区域内,并在后文对网络分布在一般形状的区域内的情况进行讨论.传统的传感器网络通常只存在一个 sink 节点.由于所有查询都必将从该节点发出,结果也返回该节点,所以此类网络在 sink 节点周围存在着无法避免的热点问题.为了避免上述问题,本文设传感器网络中存在多个 sink 节点,且它们都分布在圆形区域的边缘(如图 1 所示).对于一般形状的区域,sink 节点也分布在该区域的边缘.用户对传感器网络中不同区域提出的查询,可以由不同 sink 下发到网络,并进行结果回收,从而有效地避免了单 sink 节点网络中在 sink 节点周围出现的热点问题.下面给出本文需要用到的主要符号含义及各种定义(见表 1).

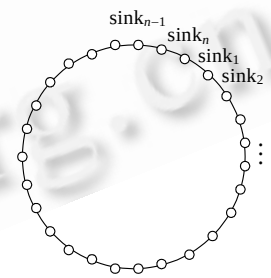

Fig.1 Distribution of multiple sinks

图 1 多 sink 分布

Table 1 Symbols used in this paper and their descriptions

表 **1** 本文使用的符号及其含义

Notation	Description	Notation	Description	Notation	Description	Notation	Description
Δt	Time of data being stored	f_e	Event producing frequency	f_q	Query frequency	t_i	Living time of the ith ring
S	Area of the network	S_i	Area of the ith ring	S_{i+}	Area from the (i+1)th to the nth ring	S_{i-}	Area from the 1st to the (i−1)th ring
$\bar{\rho}$	Average density of nodes	N_i	Node number in the ith ring	r	Radio range per node	n	Number of rings in the network
L_q	Length of query packet	L_e	Length of event data packet	L_r	Length of result packet	E	Initial energy per node

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

定义 **1**. 观测属性是指传感器监测的目标对象的一个或多个属性.

定义 **2**. 观测数据是指观测属性的具体值.

定义 **3**. 观测数据存储时间是指观测数据在网络内存储的时间长度,超过该时间段观测数据将被丢弃.

定义 **4**. 事件类型是指人们感兴趣的事情,是多个观测属性组成的谓词条件.

定义 **5**. 事件类型的一个实例称为一个事件,记为 $e(ET,g,t)$,ET 表示事件类型,g 表示事件发生的位置,t 表示事件发生的时间.

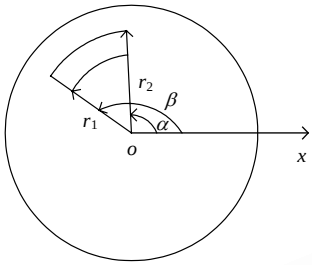

Fig.2 Partial ring

图 2 部分环

定义 **6**. 近期区域查询是指用户对从当前时刻到过去小于观测数据存储时间的某个时间的时间段内,网络中某个区域中发生某类事件个数提出的查询.

定义 **7**. 传感器网络寿命是从网络开始工作到网络中出现第 1 个能量耗尽节点的时刻之间的时间段.

定义 **8**. 部分环由一个四元组(r_1,r_2,α,β)来描述,其中,r_1 表示部分环的内径,r_2 表示部分环的外径,α表示以传感器网络分布圆形区域的圆心为圆心逆时针旋转圆半径与部分环相遇时,半径与水平所成的角度,β表示逆时针旋转圆半径离开部分环时,半径与水平所成的角度(如图 2 所示).

本文提出的数据存储及相应的查询处理算法可以处理用户提出的任意形状的近期区域查询.为叙述方便,本文首先以部分环为例介绍查询处理算法,对于一般形状的区域查询,在介绍查询处理算法时给出解决方法.

2 基于环的事件观测数据存储方法

2.1 事件观测数据的初始存储

定理 **1**. 当传感器网络分布在一个圆形区域时,事件观测数据存储在距离圆心最近的节点最节省能量.

证明:如图 3 所示,设 home 节点的位置为(x,y),网络中任意节点的位置为(x_i,y_i),网络分布的圆型区域半径为 R.由于事件可能发生在传感器网络中的任意位置,为使事件数据的存储能量消耗最小,应使 home 节点距离网络中所有节点的总距离 $D(x,y)$最小.网络中各个节点到达 home 节点的总距离为

$$D(x,y)=\iint_S[(x-x_i)^2+(y-y_i)^2]\mathrm{d}x_i\mathrm{d}y_i=\iint_S(x-x_i)^2\mathrm{d}x_i\mathrm{d}y_i+\iint_S(y-y_i)^2\mathrm{d}x_i\mathrm{d}y_i$$

$$=\int_{-R}^{R}(x-x_i)^2\mathrm{d}x_i\int_{-R}^{R}\mathrm{d}y_i+\int_{-R}^{R}\mathrm{d}x_i\int_{-R}^{R}(y-y_i)^2\mathrm{d}y_i=4R^2\left(x^2+y^2+\frac{2}{3}R^2\right),$$

$$D'_x(x,y)=8R^2x=0\Rightarrow x=0,\ D'_y(x,y)=8R^2y=0\Rightarrow y=0.$$

故把 home 节点位于圆心时最节省能量,定理 1 得证. □

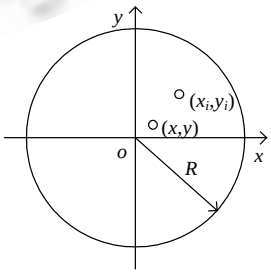

Fig.3 Selection of the home node

图 3 Home 节点的选择

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

2.2 事件观测数据的迁移

如果网络始终使用初始存储方法,将会使其中心区域成为热点.为了保证在节省能量的同时避免热点问题,本文提出基于环的负载平衡数据存储协议.该协议首先将传感器网络划分为多个环,采用数据在各个环逐步迁移的方式解决发生在 home 节点的热点问题.

目前,数据迁移方式主要有 3 种:不迁移、一次迁移和逐步迁移.如文章开始部分所述,如果不采用数据迁移方式,则会在 home 节点周围出现热点问题.若采用一次数据迁移,即单纯的外部存储方法,则无论 sink 如何分布,越靠近 sink 周围的节点必然需要传递更多的数据给 sink,造成网络能量消耗的不均衡.本文采用数据逐步迁移的方式.随着时间的前进,数据从网络中的一个环迁移到另一个环.这种数据迁移方式的好处是,数据逐步迁移避免了 home 节点周围的热点.同时,随着数据在网络内各环的迁移,查询处理可以在网络内完成,避免了过多数据向 sink 节点传递所产生的热点问题.由此可见,数据的逐步迁移既避免了在 home 节点周围产生热点,又避免了在 sink 节点周围产生热点.

下面详细介绍数据逐步迁移的过程:基于环的数据存储协议用 $n-1$ 个同心圆将网络分割成 n 个环形区域,这些同心圆的圆心与网络分布区域的圆心相同.任意两个同心圆之间的距离相同且等于 r(如图 4 所示).每个环具有一定长度的活动时间.在环的活动时间内,位于活动环内的所有节点共同负责传感器网络中发生事件的存储以及对用户查询的处理工作.当环 $i-1$ 活动时间到期后,环 i 将接替环 $i-1$ 处于活动状态.如此可以使网络中的每个节点都参与事件存储和查询处理,达到避免产生热点、延长网络寿命的目的.下面分别介绍环 i 在活动时间内存储网络内发生事件的方法、环 i 接替环 $i-1$ 的方法以及环 i 处理用户查询的方法.

首先,环 i 在活动时间内存储网络内发生事件观测数据的方法如下:设环 i 的活动时间为 t_i,则在随后的 t_i 时间段内,网络内发生的所有事件都将被传递到环 i 内的某个节点进行存储.图 5 给出了事件的存储过程:当活动环 C_i 以外的某个节点(n_1 或 n_2)发现事件后,该节点会将数据沿自身与网络圆心的连线向当前的活动环传递,并将数据存储在数据包进入活动环中遇到的首个节点(n_3 或 n_4),从而完成事件观测数据的存储.由于事件在网络中各个位置发生的概率相同,故在 t_i 时间段内,网络发生的事件可以被均匀地存储在活动环内的各个节点.第 3 节将详细给出各个环活动时间的设定及最大化网络寿命的数学模型.

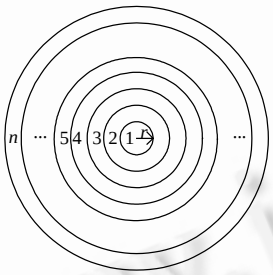

Fig.4 Partition of rings in sensor networks

图 4 传感器网络中环的划分

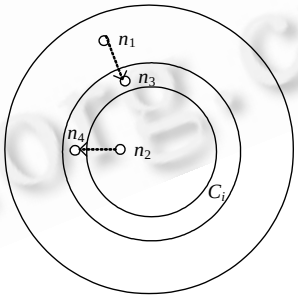

Fig.5 Storage procedure based on ring

图 5 基于环的事件存储过程

其次,环 i 接替环 $i-1$ 的方法如下:由于用户提出的是近期区域查询,在环 $i(i\neq1)$接替环 $i-1$ 的开始阶段,环 $i-1$ 内的节点必须将其在最近Δt 时间内收到的数据传递到环 i 内的某个节点,该观测数据的迁移过程称为事件观测数据的迁移.环 $i-1$ 内的节点从自己的邻居中随机寻找一个位于环 i 内的节点,将自己保存的数据传递给该节点.环的接替使数据逐渐向外层环迁移.当数据传递到最外层环时(即第 n 个环),表示传感器网络的寿命将在 t_n 时间段后结束,即再过 t_n 时间段将出现能量耗尽的节点,此后数据不会被再向其他节点传递.

最后给出用户查询处理方法.首先设用户向传感器网络发出查询区域为整个网络的近期区域查询,则对该查询的处理过程如图 6 所示.在 t_i 时间段内,用户查询被随机下发到某个 sink,查询被沿着 sink 与网络圆心的连线方向传递给环 i 内的某个随机位置.距离该位置最近的节点收到用户查询.称以网络圆心为圆心、收到用户查询的节点与网络圆心的距离为半径的圆形轨迹为查询传递轨迹.以节点自身为圆心、传输半径为半径的圆称为

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

该节点的传输圆.首先,活动环内距离随机位置最近的节点 n_1 将收到用户查询,并将此查询广播给 n_1 的所有邻居.活动环内的节点收到查询后将判断自身是否保存着满足用户查询的事件.若包含,则将与查询相关数据返回 n_1;否则将向 n_1 返回空消息.n_1 在取得环内所有邻居返回的消息后,将数据融合为一个结果数据包.然后,n_1 将结果数据包沿逆时针方向传递给其邻居中距离 n_1 的传输圆及查询传递轨迹交点最近的节点 n_2.n_2 在收到结果数据包后重复 n_1 的步骤.为了节省能量,n_1 和 n_2 共同的邻居将只对查询回答一次.

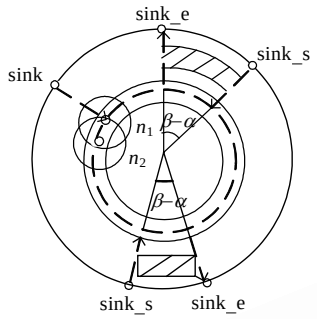

Fig.6 Query routing algorithm

图 6 查询路由算法

活动环内负责结果数据包传递的节点称为查询节点.当用户发出查询区域为(r_1,r_2,α,β)的近期区域查询时,根据前面介绍的事件存储方法,关于事件的数据被保存在活动环内位于$\beta-\alpha$之间的部分环上.故首先可以将用户查询的部分环映射到活动环内查询传递轨迹上位于$\beta-\alpha$之间的一段弧,称其为映射弧.查询节点位于映射弧附近,负责对用户查询结果的发送、接收及数据融合等.根据区域查询范围的不同,查询所对应的映射弧的弧长也不同.用户可以向任意 sink 发出区域查询,但该查询必须首先由接收查询的 sink 传输到与映射弧起点距离最近的 sink(sink_s),并由 sink_s 将查询向传感器网络内传递.最终结果由映射弧上最后收到结果数据包的节点返回到与之距离最近的 sink,并由该 sink(sink_e)将查询结果返回用户,如图 6 所示.不同 sink 节点之间可以相互通信,考虑到当前许多系统的 sink 直接与 PC 连接,故不同 sink 可以通过 PC 之间的网络通信,而不考虑 sink 之间通信的能量消耗.

对于其他形状的区域查询,可以利用如下方法将该形状映射到活动环的一段弧上,查询所需的数据即保存在活动环上被映射的部分环内的节点上.映射方法是,从圆型区域的圆心发出一条射线,逆时针旋转该射线,将射线进入用户所查区域到射线离开用户查询区域所对应的角度记为$\beta-\alpha$,则活动环内结果数据包传递轨迹上位于$\beta-\alpha$之间的一段弧,即为用户查询区域在活动环内的映射.采用与处理基于部分环相同的方法,即可处理任意形状的区域查询.图 6 中给出了处理矩形区域查询的例子.

3 各个环活动时间的设定

下面讨论为使传感器网络寿命最长,各环的最优活动时间.首先以区域查询的特例,即全局查询为例讨论各个环活动时间的设定,然后给出一般区域查询环活动时间的设定.全局查询是指用户查询整个网络范围内,某类事件发生的个数.

通过第 2 节对基于环的数据存储协议和查询路由协议的描述可知,网络中的节点只能处于两种状态:活动状态和非活动状态,故其能量消耗主要由两部分构成:(1) 当环 i 处于非活动状态时,为活动环传递查询、将结果返回 sink 以及将网络内发生的事件传递到活动环内节点所消耗的能量;(2) 当环 i 处于活动状态时,对网络内发生的事件进行存储以及对用户查询进行处理所消耗的能量.

3.1 环i处于非活动状态所消耗的能量

环 i 处于非活动状态下,其能量消耗 $E_{i_inactive}$ 由 3 部分构成:(1) 环 i 将用户查询传递给活动环所消耗的能量是 E_{i_1};(2) 环 i 将活动环产生的查询结果返回 sink 所消耗的能量是 E_{i_2};(3) 环 i 将网络内发生的事件传递给活动环所消耗的能量为 E_{i_3}.

(1) 由于环 i 仅在环 $i-1,\ldots,2,1$ 处于活动状态时向它们传递查询,所以,环 i 用于查询传递的总时间为$(t_1+t_2+\ldots+t_{i-1})$.在该时间段内,用户向传感器网络下发的查询数为 $f_q\times(t_1+t_2+\ldots+t_{i-1})$.环 i 每传递一个消息需要接收和发送该消息各一次,所以,环 i 传递查询所消耗的能量为

$$E_{i_1}=(E_r+E_s)\times L_q\times f_q\times(t_1+t_2+\ldots+t_{i-1}) \tag{1}$$

(2) 由于环 i 仅在环 $i-1,\ldots,2,1$ 处于活动状态时将它们产生的查询结果返回 sink,因此,与 E_{i-1} 的分析相同,用于结果回收的能量消耗为

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

$$E_{i_2}=(E_r+E_s)\times L_r\times f_q\times(t_1+t_2+\ldots+t_{i-1}) \tag{2}$$

(3) 在$(t_1+t_2+\ldots+t_{i-1})$时间段内,环 i 负责将环 $i+1,\ldots,n-1,n$ 上发生的事件传递到活动环.由于网络内发生的事件均匀地分布在整个网络中,所以在$(t_1+t_2+\ldots+t_{i-1})$时间段内,环 $i+1,\ldots,n-1,n$ 上发生事件的总数为 $f_e\times(t_1+t_2+\ldots+t_{i-1})\times(S_{i+}/S)$.同理,在$(t_{i+1}+t_{i+2}+\ldots+t_n)$时间段内,环 i 负责将环 $i-1,\ldots,2,1$ 内发生的事件传递到活动环,这些环内发生的事件个数为 $f_e\times(t_{i+1}+t_{i+2}+\ldots+t_n)\times(S_{i-}/S)$.最后,在$(t_{i+1}+t_{i+2}+\ldots+t_n)$时间段内,环 i 需要将自身发生的事件传递给活动环,消耗的能量是 $E_s\times f_e\times(t_1+\ldots+t_{i-1}+t_{i+1}+\ldots+t_n)\times(S_i/S)$.于是,环 i 用于传递事件所消耗的能量为

$$E_{i_3}=(E_r+E_s)\times L_e\times f_e\times[(t_1+t_2+\ldots+t_{i-1})\times(S_{i+}/S)+(t_{i+1}+t_{i+2}+\ldots+t_n)\times(S_{i-}/S)]+E_s\times f_e\times(t_1+\ldots+t_{i-1}+t_{i+1}+\ldots+t_n)\times(S_i/S) \tag{3}$$

综上,环 i 处于非活动状态所消耗的总能量为

$$E_{i_inactive}=E_{i_1}+E_{i_2}+E_{i_3} \tag{4}$$

3.2 环i处于活动状态所消耗的能量

当环 i 处于活动状态时,其能量消耗 E_{i_active} 主要用于两方面:(1) 环 i 处于活动状态时对整个网络内发生事件存储所消耗的能量为 E_{i_4};(2) 环 i 进行一次查询处理所消耗的能量为 E_{i_5}.

(1) E_{i_4} 由 3 部分构成:1) 环 i 开始活动时,需要从环 $i-1$ 取得最近Δt 时间段内网络发生的$\Delta t\times f_e$ 个事件;2) 在环 i 的活动时间段 t_i 内,网络中除了环 i 以外发生事件的总数为 $t_i\times f_e\times(1-S_i/S)$;3) 在环 i 的活动时间结束前,将$\Delta t\times f_e$ 个事件传递给环 $i+1$.于是,当环 i 处于活动状态时,用于事件存储消耗的能量为

$$E_{i_4}=\begin{cases}(E_r\times t_i\times(1-S_i/S)+E_s\times\Delta t)\times f_e\times L_e), & i=1\\(E_r\times(\Delta t+t_i\times(1-S_i/S))+E_s\times\Delta t)\times f_e\times L_e), & 1<i<n\\E_r\times(\Delta t+t_i\times(1-S_i/S))\times f_e\times L_e, & i=n\end{cases} \tag{5}$$

(2) E_{i_5} 由 4 部分构成:1) 在环 i 内发送查询所消耗的能量;2) 环 i 内各个节点返回查询结果所消耗的能量;3) 环 i 内的节点收到的来自环 $i-1$ 的查询所消耗的能量;4) 环 i 内节点收到的来自环 $i+1$ 的查询所消耗的能量.

下面对能量分析中所使用符号的含义进行说明.N_i 表示环 i 内包含的节点数. $\overline{H}_i$ 表示平均一个查询在环 i 内被广播的次数.若平均一个查询可以被环 i 内 $\overline{H}_i$ 个节点接收,由于环的宽度是 r,则当环 i 内的某个节点广播查询时,该查询会被相邻的两个环收到.设平均一个查询被环 $i-1$ 的 $\overline{N}_{i_in}$ 个节点收到,平均被环 $i+1$ 的 $\overline{N}_{i_out}$ 个节点收到,当每个节点的平均邻居数为 $\overline{N}_n$ 时,有 $\overline{H}_i=\overline{N}_n-\overline{N}_{i_in}-\overline{N}_{i_out}$.

设环 i 内的某个节点广播影响的区域与环 $i-1$ 相交部分的面积为 S_{i_in}(如图 7 所示),则

$$S_{i_in}=(r^2/2)[(i-1)^2(\alpha-\sin\alpha)+(\beta-\sin\beta)].$$

同理,计算环 i 内的某个节点广播影响的区域与环 $i+1$ 相交部分的面积为 S_{i_out},则

$$S_{i_out}=(r^2/2)[(\gamma-\sin\gamma)-(i-1)^2(\alpha-\sin\alpha)].$$

于是得 $\overline{N}_{i_in}=\dfrac{\overline{\rho}\int_0^r S_{i_in}(x)\mathrm{d}x}{r}$, $\overline{N}_{i_out}=\dfrac{\overline{\rho}\int_0^r S_{i_out}(x)\mathrm{d}x}{r}$.

$\overline{H}_i$ 的计算方法如下:当用户下发的查询类型为全局查询时,该查询将在环内传递一周.于是,消息被传递的总长度是 $2\pi[r(i-1)+x]$,根据第 2.2 节介绍的消息传递方法,每跳消息传递的最远距离为 r(如图 8 所示).但考虑到实际网络中很可能达不到这种理想情况,所以本文对消息一次传输的距离采用较保守的估计:每跳消息传递的距离为 $r/2$.即消息在某个圆型轨迹传递的总跳数为 $\dfrac{4\pi[r(i-1)+x]}{r}$,于是得 $\overline{H}_i=\dfrac{\int_0^r 4\pi[r(i-1)+x]\mathrm{d}x}{r^2}$.

根据前面 $\overline{H}_i,\overline{N}_i,\overline{N}_{i_in}$ 和 $\overline{N}_{i_out}$ 的计算结果可得:在环 i 内发送查询所消耗的能量为$(E_s+E_r\times\overline{N}_i)\times\overline{H}_i\times L_q$;环 i 内各个节点返回结果所消耗的能量为$(E_s+E_r)\times N_i\times L_r$;环 i 内的节点收到的来自环 $i-1$ 的查询所消耗的能量为 $E_r\times\overline{H}_{i-1}\times\overline{N}_{(i-1)_out}\times L_q$;环 i 内节点收到的来自环 $i+1$ 的查询所消耗的能量为 $E_r\times\overline{H}_{i+1}\times\overline{N}_{(i+1)_in}\times L_q$.

故环 i 进行一次查询处理所消耗的能量为

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

$$(E_s+E_r\times \overline{N}_i)\times \overline{H}_i\times L_q+(E_s+E_r)\times N_i\times L_r+E_r\times(\overline{H}_{i-1}\times \overline{N}_{(i-1)_out}+\overline{H}_{i+1}\times \overline{N}_{(i+1)_in})\times L_q,\ 1<i<n.$$

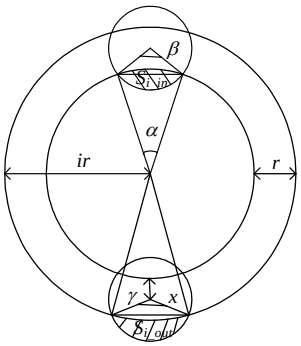

Fig.7 Sketch map of S_{i_in} and S_{i_out}

图 7 S_{i_in} 与 S_{i_out} 示意图

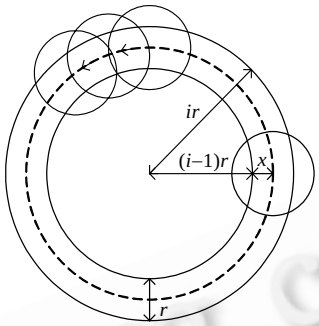

Fig.8 Query processing procedure of ring i

图 8 环 i 查询处理过程

环 i 处于活动状态的时间为 t_i,在这段时间内,用户共发出 $f_q\times t_i$ 个查询.环 i 在此时间内进行查询处理所消耗的能量为

$$E_{i_5}=\begin{cases} f_q\times t_i\times((E_s+E_r\times\overline{N}_i)\times\overline{H}_i\times L_q+(E_s+E_r)\times N_i\times L_r+E_r\times\overline{H}_{i+1}\times\overline{N}_{(i+1)_in}\times L_q), & i=1 \\ f_q\times t_i\times((E_s+E_r\times\overline{N}_i)\times\overline{H}_i\times L_q+(E_s+E_r)\times N_i\times L_r+ \\ \qquad E_r\times(\overline{H}_{i-1}\times\overline{N}_{(i-1)_out}+\overline{H}_{i+1}\times\overline{N}_{(i+1)_in})\times L_q), & 1<i<n \\ f_q\times t_i\times((E_s+E_r\times\overline{N}_i)\times\overline{H}_i\times L_q+(E_s+E_r)\times N_i\times L_r+E_r\times\overline{H}_{i-1}\times\overline{N}_{(i-1)_out}\times L_q), & i=n \end{cases} \tag{6}$$

综上,环 i 处于活动状态所消耗的总能量为

$$E_{i_active}=E_{i_4}+E_{i_5} \tag{7}$$

3.3 传感器网络寿命最大化的环活动时间设定

第 3.1 节和第 3.2 节讨论了传感器网络中各个环的能量消耗.设环 i 的活动时间为 t_i,在 t_i 时间段内,环 i 内的节点负责保存事件数据并处理用户查询,在 t_1~t_{i-1} 和 t_{i+1}~t_n 时间段内,环 i 内的节点负责对用户查询和事件数据的传递.于是,网络中的每个节点最少需要工作的时间为 $\sum_{i=1}^{n}t_i$,由定义 7,传感器网络寿命可表示为 $\sum_{i=1}^{n}t_i$.于是,传感器网络寿命最大化问题可以形式化为如下线性规划问题:

$$\max\left(\sum_{i=1}^{n}t_i\right),\quad \text{s.t. } t_i>\Delta t,\ \frac{E_{i_inactive}+E_{i_active}}{N_i}<E,\ 1\le i\le n \tag{8}$$

线性规划的第 1 个约束条件表示每个活动环的活动时间应该至少达到事件存储时间.第 2 个约束条件表示环 i 中每个节点的平均能量消耗 $E_i/N_i=(E_{i_inactive}+E_{i_active})/N_i$ 应该小于每个节点具有的初始能量 E.

在查询区域任意的条件下,各环活动时间的设定方法如下:由于用户对网络内任意区域查询的概率相等,于是,查询在环 i 上传递的弧长所对应的角度 $\beta-\alpha$ 是一个在 $(0,2\pi)$ 上服从均匀分布的随机变量,故查询传递弧长的均值是全局查询传递弧长的一半.于是,其用于查询处理所消耗的能量也将是全局查询消耗能量的一半,即 $E_{i_5}/2$.故重新设计的线性规划模型为

$$\max\left(\sum_{i=1}^{n}t_i\right),\quad \text{s.t. } t_i>\Delta t,\ \frac{E_{i_1}+E_{i_2}+E_{i_3}+E_{i_4}+E_{i_5}/2}{N_i}<E,\ 1\le i\le n \tag{9}$$

4 一般情况下环活动时间的确定

4.1 节点密度不均情况下,环活动时间的设定

前面讨论的线性规划模型假设网络内的传感器分布均匀,但在某些情况下,网络内传感器的分布并不均匀.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

当某个环内的节点分布不均衡时,必然存在环的某个区域的节点密度低于网络平均密度的情况,如果环仍按上述线性规划模型计算的时间工作,则密度较低的位置将会首先耗尽自身的能量,从而缩短网络寿命.本文采用缩短对应环活动时间的方法解决上述问题.

定义 9. 设节点以自己为圆心、以 r 为半径做圆,该圆与节点所在环围成的区域面积为 S_{n_i} , S_{n_i} 中包含的节点个数为 N_{n_i},则 N_{n_i}/S_{n_i} 称为节点 n_i 的单节点密度.

显然,环内的节点密度越高,环的活动时间应该越长.当环 i 内的节点分布均匀且密度达到网络的平均节点密度 $\bar{\rho}$ 时,环 i 的活动时间为 t_i.当环 i 节点分布不均匀时,首先计算环 i 内每个节点的单节点密度,并取其中的最小值$\rho_{i_\min}$.于是,在节点分布不均匀的情况下,环 i 的活动时间 t_i' 采用如下方法计算:

$$t_i' = \frac{\rho_{i_\min}}{\bar{\rho}} \times t_i \tag{10}$$

上述方法虽然缩短了某个环的活动时间,但可以延长整个网络的寿命.综上,环 i 活动时间的确定算法的工作过程如下:首先,根据线性规划模型式(9)计算理想情况下环 i 的活动时间;其次,计算环 i 的单节点密度,并取其中的最小值;最后,根据式(10)得到环 i 的实际活动时间 t_i' .

4.2 一般情况下节点活动时间的设定

当网络分布在非圆形区域时,仍然可以采用基于环的事件存储和查询处理协议,但需要进行适当 r 改进.方法如下:首先,寻找网络分布区域的质心,并以此为圆心,按照第 2.2 节中给出的方法作环,直到网络分布区域被最外层圆包含为止;其次,在已经形成的环型结构上执行第 4.1 节中介绍的算法,确定环 i 内各个节点的活动时间.由于网络形状的随意性,环内节点分布又存在两种情况:如果环 i 完全包含于传感器网络中,则其活动时间与传感器网络分布在圆形区域内相同;当环 i 的某些部分没有传感器时,由于传感器网络的边沿分布着许多 sink 节点,故网络中产生的事件将被存储到这些 sink 节点上.这意味着 sink 节点会在网络剩余的寿命中持续工作,但考虑到当前许多系统 sink 具有的能量远大于普通传感器节点,故 sink 有能力在网络剩余的寿命中持续工作.对环内某些部分不存在节点的查询处理采用的方式是,仍然按圆形轨迹传递查询,当到达不存在节点的位置时,该位置必存在 sink,则 sink 负责对查询的回答和查询的继续传递.

5 实 验

下面通过两组实验证明本文提出的负载平衡数据存储协议可以显著延长网络寿命:第 1 组实验讨论节点分布均衡的情况下,本文提出的各种模型对网络寿命延长的效果;第 2 组实验证明在节点不均匀分布的网络中,本文提出的模型同样可以使网络的寿命大为延长.实验采用 ns-2 对本文提出的数据存储算法进行模拟测试.实验的各种参数设置见表 2.

Table 2 Parameters set in experiments

表 2 实验参数设置

Parameters	Values	Parameters	Values
Sink number of network	40	Ring number in the network	5
Node number of uniform distribution network	316	Node number of random distribution	328
Transmitting power in watts (W)	0.66	Receiving power in watts (W)	0.395
Initial energy per node in joules (J)	0.1	Radio range per node in meters (m)	10

5.1 节点均匀分布情况下,负载平衡存储协议对网络寿命的影响

5.1.1 各个环的理论活动时间

本实验分别测试在 sink 向传感器网络下发全局查询和一般区域查询两种情况下,不同查询频率 f_q 和事件产生频率 f_e 对传感器网络理论活动时间的影响.图 9 给出了传感器网络分别在 f_q=0.1 个/s、f_e=1 个/s(1:10),f_q=0.2 个/s、f_e=1 个/s(2:10),f_q=0.1 个/s、f_e=0.5 个/s(1:5)这 3 种情况下,当 sink 向网络下发全局查询时,利用公式(8)计算得到的网络各环的理论活动时间.图 10 给出在相同的查询频率和事件产生频率条件下,sink 向网络下发一般

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

查询,根据公式(9)计算的网络各环的理论活动时间.从计算结果可见,在相同的查询频率和事件产生频率条件下,各环的活动时间差别不大.但在不同的查询频率和事件产生频率条件下,将会影响环的活动时间.特别是在查询频率偏高时,各环的理论活动时间明显减小.

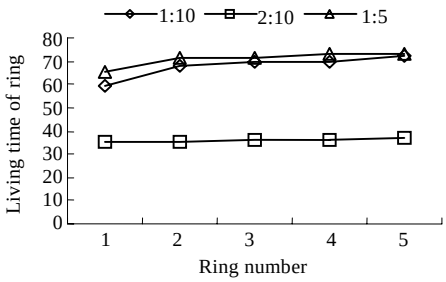

Fig.9 Living time of every ring in theory for global query when nodes are evenly distributed

图 9 节点均匀分布时全局查询下各环的理论活动时间

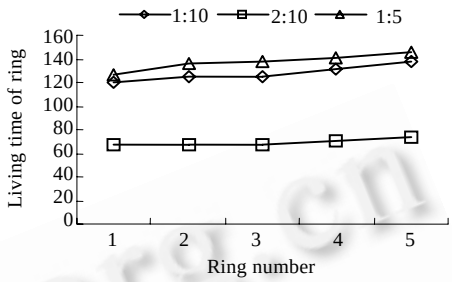

Fig.10 Living time of every ring in theory for region query when nodes are evenly distributed

图 10 节点均匀分布时区域查询下各环的理论活动时间

5.1.2 负载平衡数据存储方法下,网络的实际工作时间以及与其他方法的比较

本实验利用第 5.1.1 节得到的各环理论活动时间设定各环的活动时间,并与 GHT(geographic Hash table)[5]数据存储方法的工作时间进行比较.其中,GHT 方法所用到的 home 节点位于传感器网络的中心.sink 及网络内的节点按照第 5.1.1 节中介绍的频率关系向网络下发查询及产生事件.全局查询和一般区域查询的实验结果如图 11、图 12 所示.

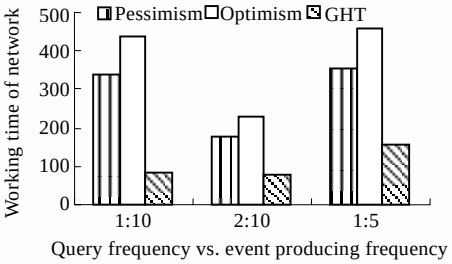

Fig.11 Living time of different methods for global query when nodes are evenly distributed

图 11 节点均匀分布时全局查询下不同方法的活动时间

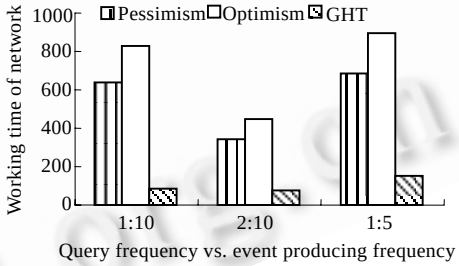

Fig.12 Living time of different methods for region query when nodes are evenly distributed

图 12 节点均匀分布时区域查询下不同方法的活动时间

从实验结果可见,GHT 方法由于无法避免的热点问题使得网络的寿命最短.对负载平衡方法将各环的活动时间按公式(8)或公式(9)的计算结果设定的方法称为悲观的网络工作时间设定(pessimism),因为上述公式在计算网络寿命时采用较保守的估计.即使如此,悲观设定方法与 GHT 方法相比仍然可以显著延长网络寿命.其原因在于负载平衡方法消除了 GHT 数据存储方法中存在于 home 节点周围的热点问题.由于本文的网络寿命模型在计算查询处理的能量消耗时采用较保守的方式,当各环按悲观方法设定的活动时间工作完毕后,环内各节点还会剩余一些能量(参见第 5.1.3 节),故可以适当延长各环的活动时间.本文将各环的活动时间比理论值延长 30%,称该活动时间设定方法为乐观方法(optimism).以乐观方法对网络各环的活动时间重新设定并进行模拟.结合第 5.1.3 节,当按照乐观方法进行各环活动时间的设定后,网络的寿命可以达到所设定的时间,且此时各环内节点的能量消耗更为彻底,因此,乐观的设定方法可以进一步延长传感器网络的寿命.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

5.1.3 应用负载平衡数据存储方法的网络中各节点的能量消耗情况以及与其他方法的比较

本实验设定 f_q=0.1 个/s、f_e=1 个/s,比较传感器网络采用负载平衡数据存储时各环的活动时间按悲观方式设定、各环的活动时间按乐观方式设定以及传感器网络采用 GHT 数据存储这 3 种不同的方法所有节点的能量消耗情况.比较的结果如图 13、图 14 所示.实验中每个节点的初始能量为 0.1J,以 0.02J 为递增单位划分为 5 个能级.图 13、图 14 中横轴表示采用不同方法后,传感器网络中出现首个能量耗尽的节点时,各个节点消耗的能量所属的能级.

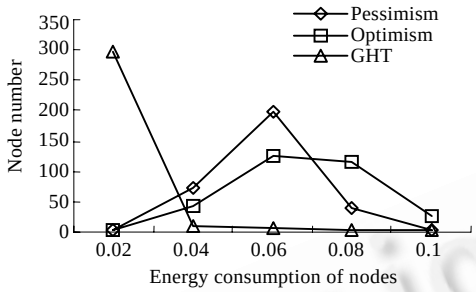

Fig.13 Energy consumption of different methods for global query when nodes are evenly distributed

图 13 节点均匀分布时全局查询下各种方法的能量消耗

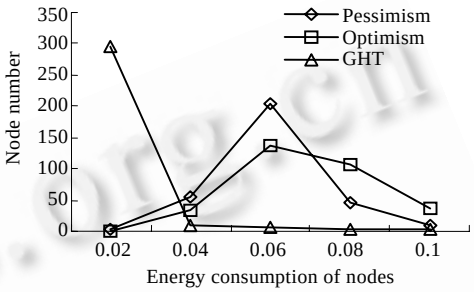

Fig.14 Energy consumption of different methods for region query when nodes are evenly distributed

图 14 节点均匀分布时区域查询下各种方法的能量消耗

从实验结果可见,与悲观方法及 GHT 方法相比,乐观方法使各个节点的能量得到更加充分的利用,且各个节点的能量消耗更接近.这主要是因为负载平衡的数据存储方法采用环轮换工作的机制,使得所有节点可以均匀地消耗能量,从而延长了网络寿命.与之相反,GHT 存储方法将数据仅保存在 home 节点上,造成 home 及其附件节点的能量被很快耗尽,与此同时,网络内其他节点的能量消耗却非常少,明显缩短了采用 GHT 数据存储方法传感器网络的寿命.

5.2 节点随机分布情况下,负载平衡存储方法对网络寿命的影响

5.2.1 各个环的理论活动时间

图 15、图 16 给出了节点位置随机产生的传感器网络分别在 f_q=0.1 个/s、f_e=1 个/s(1:10),f_q=0.2 个/s、f_e=1 个/s(2:10),f_q=0.1 个/s、f_e=0.5 个/s(1:5)这 3 种情况下,sink 向网络下发全局查询和一般查询时,利用第 4.1 节 r 方法计算的网络各环的理论活动时间.由于各环的结点密度不均匀对网络中的某些环的活动时间产生了影响,某些环的活动时间比理想情况下有所缩短,但各环活动时间的规律与第 1 组实验基本相同.

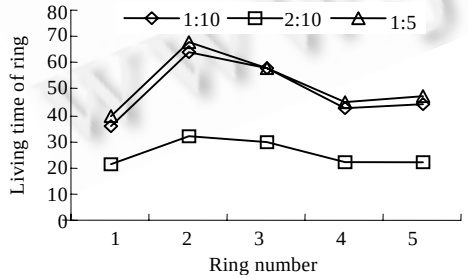

Fig.15 Living time of every ring in theory for global query when nodes are randomly distributed

图 15 节点随机分布时全局查询下各环的理论活动时间

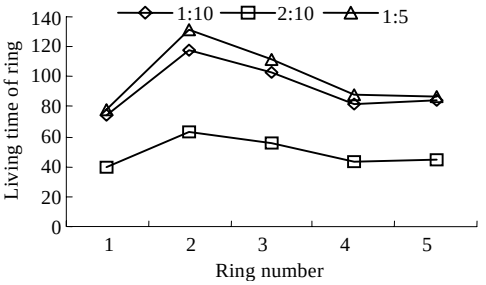

Fig.16 Living time of every ring in theory for region query when nodes are randomly distributed

图 16 节点随机分布时区域查询下各环的理论活动时间

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

5.2.2 负载平衡数据存储方法下,网络的实际工作时间以及与其他方法的比较

本实验分别将负载平衡存储方法的各环活动时间按乐观方式进行设定,并与网络工作时间按悲观方式设定以及采用 GHT 数据存储方法的网络工作时间进行比较(如图 17、图 18 所示).实验结果表明,负载平衡的数据存储方法(optimism)与 GHT 数据存储方法相比,使得传感器网络的寿命大为延长.

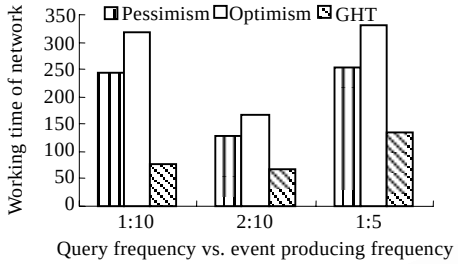

Fig.17 Living time of different methods for global query when nodes are randomly distributed

图 17 节点随机分布时全局查询下不同方法的活动时间

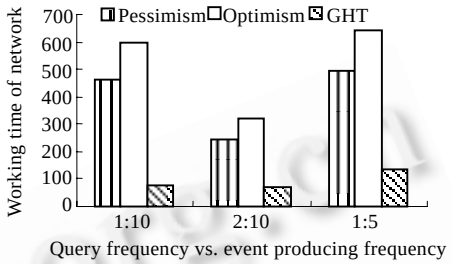

Fig.18 Living time of different methods for region query when nodes are randomly distributed

图 18 节点随机分布时区域查询下不同方法的活动时间

5.2.3 负载平衡存储方法下,网络中各节点的能量消耗情况以及与其他方法的比较

本实验设定 f_q=0.1 个/s、f_e=1 个/s,比较网络按负载平衡方式工作且各环活动时间按乐观方法设定以及网络按 GHT 数据存储方法工作两种数据存储方式下所有节点的能量消耗情况.比较的结果如图 19、图 20 所示.实验中每个节点的初始能量为 0.1J,以 0.02J 为递增单位划分为 5 个能级.结果表明,本实验中各个节点的能量消耗没有第 5.1.3 节各个节点的能量消耗彻底.这是由于各环受单节点密度偏低位置的影响,使得环活动时间减小,某些节点不能充分利用其能量造成的.

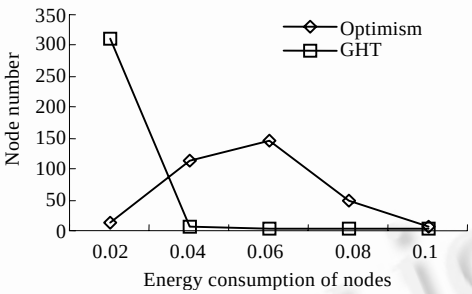

Fig.19 Energy consumption of different methods for global query when nodes are randomly distributed

图 19 节点随机分布时全局查询下各种方法的能量消耗

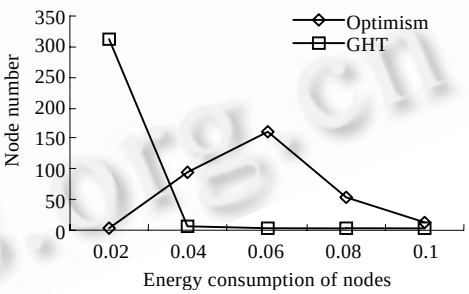

Fig.20 Energy consumption of different methods for region query when nodes are randomly distributed

图 20 节点随机分布时区域查询下各种方法的能量消耗

6 结 论

本文提出一种基于环的负载平衡数据存储协议以及基于此存储方法的查询处理方法,两者共同实现了对近期区域查询的有效处理.与传统的数据存储方法相比,本文提出的方法充分利用网络中所有节点的能量进行数据存储和查询处理,而不是将这些任务仅集中在网络内较少的一部分节点上.最后,本文通过模拟实验证明,负载平衡的数据存储协议较之传统的数据存储方法可以显著延长传感器网络的寿命.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

References:

[1] Bonnet P, Gehrke JE, Seshadri P. Towards sensor database systems. In: Tan KL, Franklin MJ, Lui JCS, eds. Proc. of the 2nd Int'l Conf. on Mobile Data Management. Hong Kong: Springer-Verlag, 2001. 3–14.

[2] Madden SR, Franklin MJ, Hellerstein JM, Hong W. The design of an acquisitional query processor for sensor networks. In: Halevy AY, Ives ZG, Doan AH, eds. Proc. of the SIGMOD Conf. New York: ACM Press, 2003. 491–502.

[3] 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

[4] Scott S, Sylvia R, Brad K, Ramesh G, Deborah E. Data-Centric storage in sensornets. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2003,33(1):137−142.

[5] Sylvia R, Brad K, Scott S, Deborah E, Ramesh G, Li Y, Fang Y. Data-Centric storage in sensornets with GHT, a geographic hash table. Mobile Networks and Applications, 2003,8(4):427−442.

[6] Abhishek G, Jens G, John C. Resilient data-centric storage in wireless ad-hoc sensor networks. In: Arkady Z, eds. Proc. of the 4th Int'l Conf. on Mobile Data Management. London: Springer-Verlag, 2003. 45−62.

[7] Deepak G, Ben G, Denis P, Deborah E, John H. An evaluation of multi-resolution storage for sensor networks. In: Ian A, Deborah E, eds. Proc. of the 1st Int'l Conf. on Embedded Networked Sensor Systems. New York: ACM Press, 2003. 89–102.

[8] Deepak G, Deborah E, John H. Dimensions: Why do we need a new data handling architecture for sensor networks. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2003,33(1):143−148.

[9] Benjamin G, Deborah E, Ramesh G, Sylvia R, Scott S. DIFS: A distributed index for features in sensor networks. In: Erdal C, Taieb Z, Eylem E, eds. Proc. of the 1st IEEE Int'l Workshop on Sensor Network Protocols and Applications. Washington: IEEE Computer Society, 2003. 163−173.

[10] Xin L, Young JK, Ramesh G, Wei H. Multi-Dimensional range queries in sensor networks. In: Ian A, Deborah E, eds. Proc. of the 1st Int'l Conf. on Embedded Networked Sensor Systems. New York: ACM Press, 2003. 509−517.

[11] Guo LJ, Li JZ, Li GL. Spatio-Temporal query processing method in wireless sensor networks. Journal of software, 2006,17(4): 794−805 (in Chinese with English abstract). http://www.jos.org.cn/1000-9825/17/794.htm

[12] Wensheng Z, Guohong C, Tom LP. Data dissemination with ring-based index for wireless sensor networks. In: Kevin A, Ken C, eds. Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Network Protocols. Washington: IEEE Computer Society, 2003. 305−314.

附中文参考文献:

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

[11] 郭龙江,李建中,李贵林.无线传感器网络环境下时-空查询处理方法.软件学报,2006,17(4):794−805. http://www.jos.org.cn/1000-9825/17/794.htm

李贵林(1979－),男,黑龙江哈尔滨人,博士生,主要研究领域为传感器网络.

高宏(1966－),女,博士,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为数据仓库,传感器网络数据管理.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn