

基于虚拟环的无线传感网节能数据存储与查询机制

邓晓军 欧阳旻 李玉龙

(湖南工业大学计算机与通信学院 株洲 412007)

摘要 为了提高无线传感器网络的数据存储以及查询效率,同时尽可能地减少网络的能量消耗,延长网络正常工作的生命周期,提出一种基于虚拟环的节能数据存储与查询机制。该机制将传感器网络域划分成许多虚拟的环形网络,再通过基于最小网络能量消耗量的价值成本函数来定义集合环,通过集合环来执行事件数据的存储及查询任务。仿真结果表明,相比 SDS 方案以及其他节能的数据存储方案,该方案在延长网络的生命周期、提高能量利用效率上均获得了更好的效果。

关键词 无线传感器网络,虚拟环,集合环,数据存储,数据查询

中图法分类号 TP393 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2015.8.028

Energy-efficient Wireless Sensor Network Data Storage and Query Mechanism Based on Virtual Ring

DENG Xiao-jun OU-YANG Min LI Yu-long

(College of Computer and Communication, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412007, China)

Abstract In order to improve the efficiency of data storage and query in wireless sensor networks, minimize the energy consumption of the network and extend the life cycle of a network to work simultaneously, an energy-efficient wireless sensor network data storage and query mechanism based on the virtual ring was proposed. Sensor network domain will be divided into many virtual ring network, then the collection ring is defined by a function of the value of the cost based on minimum network energy consumption, and the storage and query tasks of event data are executed through collection ring. The simulation results show that compared with other energy-saving programs and data storage solutions, the proposed SDS obtains better results in the extension of the network life cycle and the improvement of energy efficiency.

Keywords Wireless sensor networks, Virtual ring, Collection ring, Data storage, Data query

无线传感器网络(WSN)是一种由大量的分布式低功耗且廉价的传感器装置组成的无线网络。在无线传感器网络中,可以通过节点的部署来监测环境。无线传感器网络已被用于军用、商用和民用的许多应用领域。无线传感器网络的数据存储方案可以将节点感测到的数据进行存储,并在需要查询数据时启动搜索服务^[1-3]。对于一个数据存储服务来说,其所面临的一个主要挑战是如何有效地汇聚节点的数据并可以在网络中查询数据。此外,节点的能量有限也是数据存储方案主要的制约因素之一,因为当需要访问由 WSN 节点捕获的数据时,如果节点能量不足,将导致查询服务失效。快速的数据检索服务也是数据存储方案需要考虑的一个重要方面,尤其是在一些时间关键型的应用程序中,快速的数据检索可以有效地节省时间^[4,5]。一个性能更好的数据存储方案还需要考虑多属性数据时的相似性搜索情况。相似性搜索使用户在指定的相似性范围内通过精确的匹配技术来搜索数据,避免由于数据的相似性而导致搜索失误^[6,7]。

无线传感器网络的应用范围广泛,且节点收集的数据往往具有较高的应用价值,而节点数据的存储以及查询需要一

种高效的数据存储方案,才能使得用户能够更好地利用收集到的数据。对此,许多科研人员展开了研究并提出了自己的方法。在国内,李志刚等^[8]提出大规模无线传感器网络中基于振荡轨迹的数据存储与发现机制,该机制使得每个节点根据局部信息和预设的反射角度进行路由选择和数据转发,并使消费者节点和生产者节点将查询或者数据存储到相应的振荡路径上,保证了数据查询的成功率。曾革新等^[9]提出一种无线传感器网络分布式安全存储方案,其运用 Reed Solomon Code 对数据进行加密,并且运用消息认证码进行认证,使部分节点失效时仍能恢复原始数据,并且能避免恶意节点的数据伪造,确保了数据安全,同时也能更好地节省存储空间,避免了由于中心节点失效导致的数据丢失或泄漏问题。雷凤宇等^[10]提出基于动态多簇密钥管理模型的安全数据聚合方案,该方案以簇为单位进行密钥管理,极大地节省了密钥存储空间,同时密钥分发过程安全高效,节点加入和退出时密钥更新开销小,提升了数据存储的安全性。Haiying Shen 等^[11]提出一种无线传感器网络的分布式时空相似性的数据存储方案(SDS),SDS 提供高效的时空性和相似性的数据检索服务,并

到稿日期:2014-09-04 返修日期:2014-12-11 本文受湖南省自然科学基金项目(2015JJ2046,2014JJ2115,2012JJ2036),湖南省教育厅资助科研项目(12C0068)资助。

邓晓军(1974—),男,硕士,副教授,主要研究方向为图像处理 and 算法分析, E-mail: dengxiaojun1s@163.com; 欧阳旻(1975—),男,硕士,讲师,主要研究方向为计算机网络和分布式计算; 李玉龙(1976—),男,硕士,讲师,主要研究方向为软件工程和传感器网络。

且该数据存储方案适用于静态和动态无线传感器网络。Wen-Hwa Liao 等^[12]提出一种能量高效的无线传感器网络数据存储方案,该方案采用一种网格基础架构,其中每一个网格保证了两个传感器保留在活动模式下,而其它的传感器保持在睡眠模式,以节省能源。该节能型数据存储方案可以降低能耗。

1 网络模型及定义

用一个无向图 $G=(V, E)$ 来表示传感器网络,其中 V 是传感器节点集合, E 表示链路集合,每个传感器节点有一个唯一的标识,并且在一个坐标系系统中能够得到其自身的位置信息。每个节点能够在其通信范围内与其他节点进行通信^[13,14]。假设所有的节点有相同的通信半径 R ,对于任意两个节点 v_i 和 v_j ,它们之间的距离采用欧几里得距离公式进行计算:

$$d(v_i, v_j) = \sqrt{(x_i^2 - x_j^2) + (y_i^2 - y_j^2)} \quad (1)$$

其中, (x_i, y_i) 表示对应的节点 v_i 的坐标。

节点之间通过多跳方式进行数据的转发。传感器节点的主要任务是检测事件并接受用户的事件查询请求。假设传感器检测的事件被划分为多个类,每个类通过节点加以标识^[15,16],每个事件被定义为 $h=(x, y, r, t, c)$,其中 x, y 表示事件发生的节点坐标, r 表示为了检测该事件节点所覆盖的区域的半径, t 表示事件发生时的时间戳, c 表示事件的类别,检测该事件的节点集用 V_h 来表示。查询事件用 $z=(v, c, \phi)$ 表示,其中 v 表示查询的节点, c 表示目标事件的类别, ϕ 是查询事件发生的时间间隔。节点只能在事件发生的时间间隔里进行检测,假设查询结果能够在网络中通过节点进行传播。事件存储和查询都是网络系统重要的方面,由于网络节点是随机分布式部署的,因此网络中检测到的事件被存储在一些节点中并且能够被网络的其他节点查询。由于节点是由电池供电,节点能量有限,因此在该网络模型中,在有效存储和查询事件的同时,有效节省网络能量,延长网络的生命周期,也是本文考虑的一个重点。

2 数据存储与查询方案

2.1 虚拟环的构建

本文的分布式数据存储方案采用一种基于虚拟环的数据存储的方法,传感器网络域被划分成许多虚拟的环形网络,如图 1 所示, D 表示传感器网络的覆盖区域,在覆盖区域的中心有一个汇聚节点 $sink$,其他节点为传感器节点, L_D 表示汇聚中心到某个虚拟环边缘的距离,环与环之间的间隔距离相等。其中一个虚拟环被选择出来负责数据存储和查询的功能,我们将该环称为集合环。当节点采集的事件数据处于集合环外时,则这些事件数据将被发送到该集合环存储起来;如果节点位于集合环内,则事件数据存储于本地。数据检索可以通过查询该集合环上的节点来实现。

对于每个虚拟环,假设它们都有一个 ID,越接近汇聚节点的虚拟环的 ID 越大,每两个相邻的虚拟环的 ID 的差值为 1,最接近汇聚节点的虚拟环的 ID 号为 1。对于每个节点,它首先计算与汇聚节点的直线距离,再通过距离的大小决定它

属于哪个虚拟环,假设在 D 区域内汇聚节点与最远处的节点之间的距离为 d_{max} ,确定传感器节点所属的虚拟环的方法如下。

从节点 v_i 到汇聚节点中心的距离不超过 d_{max} 时,如果下面的不等式成立,则 v_i 确定自己所在虚拟环的 ID 为 k :

$$\frac{d_{max}}{n}(k-1) < d(sink, v_i) \leq \frac{d_{max}}{n}k \quad (2)$$

其中, $d(sink, v_i)$ 表示节点 v_i 与汇聚节点的距离, n 表示环数。

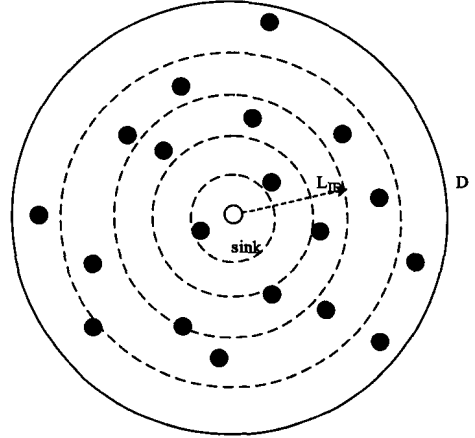


图 1 虚拟环形网络的划分

2.2 基于集合环的事件存储与查询

在确定集合环之前,汇聚节点先从网络中收集每个节点的信息。信息包含了节点的位置、事件频率、查询频率。接着汇聚节点以一个集中的方式确定集合环。最后,汇聚节点广播集合环的 ID 给所有的传感器节点。汇聚节点确定集合环的策略如下所述。ID 为 k 的虚拟环满足式(3)时,将被确定为集合环:

$$\{ \frac{E_{cost}(k)}{m_k} < \frac{E_{cost}(i)}{m_i} | i \neq k, 0 \leq i \leq n \} \quad (3)$$

其中, $E_{cost}(i)$ 表示每次时隙间隔中在虚拟环 i 中所有节点的事件存储和事件查询的成本价值。 m_i 表示在虚拟环 i 中的节点数量。成本价值 $E_{cost}(i)$ 与能量消耗量有关。

$$E_{cost}(i) = \sum_{j=1}^N E_j \quad (4)$$

E_j 共由 3 部分的能量组成,即 E_s :在时间时隙中负责传输事件数据到汇聚节点进行存储所需消耗的能量; E_q :在时间时隙中发送事件数据查询请求到汇聚节点需要消耗的能量; E_r :得到查询结果后返回给其他点所需要消耗的能量。

因此, E_j 的计算公式:

$$E_j = E_s + E_q + E_r \quad (5)$$

在确定集合环之前最重要的步骤是计算出 E_j 。假设 T_s 是一个单位时隙, E_s 的计算公式为:

$$E_s = p_d \times F_d \times (E_r + E_t) \quad (6)$$

其中, p_d 表示事件数据包的大小; F_d 表示数据包的生成频率; E_t 和 E_r 分别表示发射和接收的能量消耗。

对于 E_q ,需要估计到达虚拟环进行查询的跳数。假设跳数为 Hop ,则 Hop 的计算公式为:

$$Hop = \theta \times \frac{d_{max}}{n}i \quad (7)$$

其中, θ 表示虚拟环的节点与汇聚节点间的平均角度, i 表示

该虚拟环的 ID。

计算出 Hop 后,可以得到 E_q 的计算公式:

$$E_q = F_d \times p_d \times (Hop + |ID_j - i|) \quad (8)$$

对于 E_r ,需要估计虚拟环将查询结果返回到节点所需要的跳数。假设跳数为 Hop_r ,查询事件数据的节点的坐标为 (x_k, y_k) ,汇聚节点的坐标为 (x_s, y_s) ,则跳数 Hop_r 的计算公式为:

$$Hop_r = \frac{\sqrt{(x_k^2 - x_s^2) + (y_k^2 - y_s^2)}}{\frac{d_{max}}{n}} \quad (9)$$

则 E_r 的计算公式为:

$$E_r = F_d \times p_d \times Hop_r (E_r + E_i) \quad (10)$$

通过式(6)、式(8)、式(10)可以求出 E_j 的值,再根据 E_j 求出成本价值,从而根据成本价值来选择集合环,承担数据存储和查询的任务。

3 仿真实验与结果分析

在仿真实验中,通过 Matlab 仿真来得到本文提出的方案的结果,仿真的参数如表 1 所列。假定传感器节点随机分布在一个 $200m \times 200m$ 的正方形区域内,每个传感器有自身的位置信息。所有传感器节点有 50m 的通信半径,算法的总仿真时间为 600s,且每次的时隙间隔设置为 0.1s。传感器的发射状态、接收状态、空闲状态和睡眠状态的能量消耗分别为 40mW、40mW、20mW、10mW。每个传感器节点的初始能量都为 5W,在默认的条件下,传感器节点的数量为 500。事件的存储速率设置为每 3s 一个事件,事件的查询速率为每 5s 一个事件。

表 1 网络参数设置

Symbol	Definition	Value
D	Size of the sensing region	200m×200m
N	Number of sensor nodes	500
R	Transmission range	50m
t	Simulation time	600s
Ts	Slot time	0.1s
E_r	Power consumption in receiving	40mW
E_t	Power consumption in transmitting	40mW
E_i	Power consumption in idle listing	20mW
E_s	Power consumption in sleeping	10mW
V_s	Event storage rate	Per 3s
V_q	Event query rate	Per 5s

实验主要就网络生命周期和网络剩余能量进行对比验证,对比组为文献[11]中的 SDS 方案,以及文献[12]中 Wen-Hwa 提出的方案。其中网络生命周期定义为第一个节点能量衰竭的时间。对于算法网络生命周期的仿真结果,通过验证不同节点数量、不同的事件存储量以及不同的事件查询量下的网络生命周期来进行分析。对于网络剩余能量,通过不同的事件存储量以及不同的事件查询量下的网络剩余能量占初始总能量的比值来进行讨论。

图 2 的结果显示了节点数量从 100 增加到 800 的过程中网络生命周期的变化。从图 2 的结果可以看出,随着传感器节点数量的增加,本文方案的网络生命周期也在逐渐延长,且网络的存活时间比 SDS 方案以及 Wen-Hwa 提出的方案更长。这主要是因为本文的方案选择了成本价值更低的虚拟环

来作为集合环进行事件数据存储以及查询,实现了能量利用的最优化。

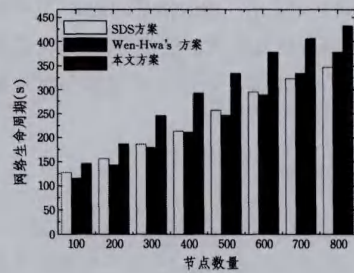


图 2 不同节点数量下的网络生命周期

图 3 显示了在存储事件数量增加的情况下网络生命周期的变化。从图中的结果可以看出,存储事件的数量增多时,网络的生命周期会缩短,但影响并不是很大,对本文方案的影响为每增加 100 个事件数据时,网络生命周期平均减少 14.6s。而本文的方案比 SDS 方案以及 Wen-Hwa 提出的方案在平均网络生命周期上分别多出了 81.3s 和 76.1s。

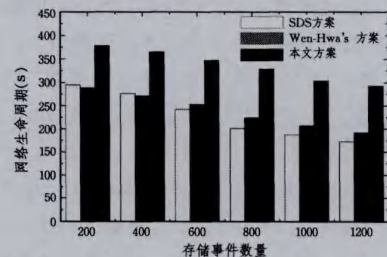


图 3 不同的存储事件数量下的网络生命周期

图 4 的结果为不同的查询事件数量下的网络生命周期情况。从图 4 的结果可以看出,查询事件数量增多时,对网络生命周期的影响比存储事件数量变化带来的影响要大。以本文方案为例,每增加 100 个查询事件数时网络生命周期减少 17.2s。相比 SDS 方案以及 Wen-Hwa 提出的方案,本文方案在查询事件数逐渐增多的情况下,平均网络生命周期分别多出了 115s 和 105s。

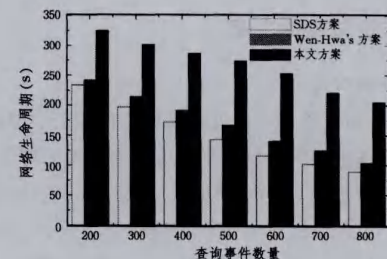


图 4 不同的查询事件数量下的网络生命周期

为了验证本文方案的节能效果,在仿真 600s 结束后,获取网络的剩余能量总量,并求得网络剩余能量与网络初始的总能量的比值。图 5 为存储事件的数量从 200 增加到 1200 的过程中,网络的剩余能量比值的变化情况。从图 5 的结果可以看出,本文方案的网络剩余能量比值优于 SDS 方案以及 Wen-Hwa 提出的方案,尤其是在存储事件数量达到 1200 时,本文方案的网络剩余能量比值为 0.51,而 SDS 方案为 0.14, Wen-Hwa 提出的方案为 0.17。可以看出,本文方案在数据

存储上具有更好的节能效果。

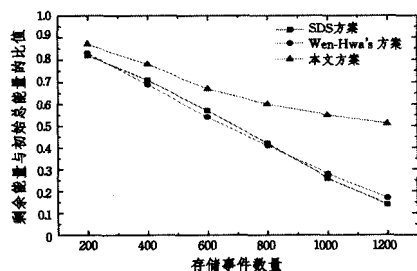


图5 不同的存储事件数量下的剩余能量比值

图6为查询事件的数量从200增加到800的过程中,网络的剩余能量比值的变化情况。从图中的结果可以看出,本文算法在事件查询上相比SDS方案以及Wen-Hwa提出的方案具有更好的节能效果,尤其在查询事件的数量达到800时,本文方案的剩余能量比值为0.54,SDS方案为0.28,Wen-Hwa提出的方案为0.27。SDS方案与Wen-Hwa提出的方案的网络剩余能量情况相近,而本文的方案比它们分别多出了0.26和0.27。因此综合来看,本文方案在事件查询上具有更好的节能效果。

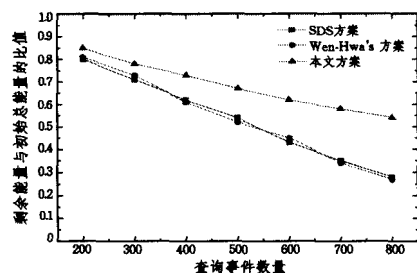


图6 不同的查询事件数量下的剩余能量比值

结束语 为了使无线传感器网络在实现数据有效存储与查询的同时,尽可能地减少能量消耗,本文采用了无线传感网中一种基于虚拟环的节能数据存储与查询方案。该方案通过将传感器网络域划分成许多虚拟的环形网络,构建多个虚拟环,再通过价值成本函数来寻找集合环,通过集合环来承担数据存储及查询的任务,有效减少了网络的能量消耗。从实验仿真情况来看,本文的方案比SDS方案以及Wen-Hwa提出的方案具有更好的效果。

参考文献

- [1] Zhou H X, Wen Q Y. Data Storage Scheme of Sensor Network Based on HDFS[J]. *Advanced Materials Research*, 2014 (926-930): 2462-2465
- [2] Barsoum A, Hasan A. Enabling dynamic data and indirect mutual trust for cloud computing storage systems[J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2013, 24(12): 2375-2385
- [3] Wang C, Chow S S M, Wang Q, et al. Privacy-preserving public auditing for secure cloud storage[J]. *IEEE Transactions on Computers*, 2013, 62(2): 362-375
- [4] 蒋鹏, 吴建峰, 吴斌, 等. 基于自适应最优消零的无线传感器网络数据压缩算法研究[J]. *通信学报*, 2013, 34(2): 1-7
Jiang Peng, Wu Jian-feng, Wu Bin, et al. Data compression method

- for wireless sensor networks based on adaptive optimal zero suppression[J]. *Journal on Communication*, 2013, 34(2): 1-7
- [5] Mao K, Zhao X, Shao Q, et al. Data Storage Scheme Supporting for Multidimensional Query[J]. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2013, 22(1): 222-230
- [6] Ren Y, Oleshchuk V A, Li F Y. Optimized secure and reliable distributed data storage scheme and performance evaluation in unattended WSNs[J]. *Computer Communications*, 2013, 36(9): 1067-1077
- [7] Kumar N, Kim J. Probabilistic trust aware data replica placement strategy for online video streaming applications in vehicular delay tolerant networks[J]. *Mathematical and Computer Modelling*, 2013, 58(1): 3-14
- [8] 李志刚, 肖依, 褚福勇. 大规模无线传感器网络中基于振荡轨迹的数据存储与发现机制[J]. *计算机研究与发展*, 2010, 33(11): 1911-1918
Li Zhi-gang, Xiao Nong, Chu Fu-yong. A Bouncing-track based data storage and discovery scheme in large-scale sensor networks[J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2010, 33(11): 1911-1918
- [9] 曾新革, 马征, 王国军. 无线传感器网络中一种分布式安全存储方案[J]. *传感技术学报*, 2011, 24(8): 1187-1192
Zeng Xin-ge, Ma Zheng, Wang Guo-jun. A secure distributed data storage scheme for wireless sensor networks[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2011, 24(8): 1187-1192
- [10] 雷凤宇, 秦玉化, 陈文鑫, 等. 基于动态多簇密钥管理模型的安全数据聚合方案[J]. *计算机科学*, 2011, 38(9): 36-40
Lei Feng-yu, Qin Yu-hua, Chen Wen-xin, et al. Data aggregation security solution based on key management scheme of dynamic multi-cluster[J]. *Computer Science*, 2011, 38(9): 36-40
- [11] Shen H, Zhao L, Li Z. A distributed spatial-temporal similarity data storage scheme in wireless sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2011, 10(7): 982-996
- [12] Liao W H, Yang H C. An energy-efficient data storage scheme in wireless sensor networks[C]// *Network Operations and Management Symposium (NOMS)*. IEEE, 2012: 478-481
- [13] Hancke G P, Gungor V C. Guest Editorial Special Section on Industrial Wireless Sensor Networks[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2014, 10(1): 762-765
- [14] Liu B, Dousse O, Nain P, et al. Dynamic coverage of mobile sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2013, 24(2): 301-311
- [15] Liu Y, Zhan Y, Chen J, et al. An Integrated Approach to Sink and Sensor Role Selection in Wireless Sensor Networks: Using Dynamic Programming[J]. *Ad hoc & Sensor Wireless Networks*, 2014, 21(3/4): 177-199
- [16] Crowcroft J, Segal M, Levin L. Improved structures for data collection in static and mobile wireless sensor networks[J]. *Journal of Heuristics*, 2014, 21(2): 1-24
- [17] 屈峰, 杨华, 王立军, 等. 无线传感器网络及其应用[J]. *四川兵工学报*, 2013, 34(2): 111-113
Qu Feng, Yang Hua, Wang Li-jun, et al. Application of Wireless Sensor Networks[J]. *Journal of Sichuan Qrdnance*, 2013, 34(2): 111-113