

无线传感器网络中数据存储与访问研究进展

蔚赵春^{1,2}, 周水庚^{1,2}, 关佶红³

- (1. 复旦大学计算机科学与工程系, 上海 200433;
2. 上海市智能信息处理重点实验室, 上海 200433;
3. 同济大学计算机科学与技术系, 上海 200092)

摘要: 无线传感器网络集感知、计算和无线通信为一体, 是以数据为中心的网络, 因此数据存储与访问是无线传感器网络研究中的重要问题. 本文围绕无线传感器网络以数据为中心这一条主线, 对其中数据存储与访问的国内外研究进展进行了综述. 首先概述了无线传感器网络中的数据存储与访问的概念与技术; 然后详细探讨了各种数据存储策略, 重点分析了分布式数据存储和信息中介; 其次详细介绍了查询的分类、查询处理模型以及优化策略; 最后对无线传感器网络中数据存储与访问技术进行了展望.

关键词: 无线传感器网络; 数据存储; 数据访问; 信息中介; 查询处理

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2008)10-2001-10

Data Storage and Access in Wireless Sensor Networks: A Survey

YU Zhao chun^{1,2}, ZHOU Shui geng^{1,2}, GUAN Ji hong³

- (1. Department of Computer Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China;
2. Shanghai Key Laboratory of Intelligent Information Processing, Shanghai 200433, China;
3. Department of Computer Science and Technology, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Data storage and access in wireless sensor networks (WSNs), broadly referred as to data management, specifies how data is stored and how queries are disseminated to acquire the relevant data, which has become an important research issue of WSNs. From the perspective of data centric network, this paper surveys the state of the art techniques of data storage and access in WSNs. First, the basic concepts of data storage and access in WSNs are introduced, then data storage strategies are summarized, and distributed data storage and information brokerage techniques are discussed in detail. Following that, query processing methods are presented, including query categorization, query processing models and optimization techniques. Finally, we conclude the paper and highlight the future development of storage and access techniques of WSNs.

Key words: wireless sensor networks; data storage; data access; information brokerage; query processing

1 引言

无线传感器网络(简称 WSNs)^[1~3] 由于其潜在、广阔的应用前景成为微电子、通信、网络与数据库等领域的研究热点. 它集感知、计算、无线通信为一体, 通过各类微型传感器近距离对物理世界的目标实时监测, 以前所未有的速度产生大量的感知数据, 后经嵌入式微处理器加工处理, 并由无线通信网络将信息传送到远程用户. 尽管应用场景和硬件部署不尽相同, 但最终目的是对感知数据进行获取、处理和传输, 使用户从中获得感兴趣的信息^[4], 所以无线传感器网络是以数据为中心的网络. 因此, 传感器网络中感知数据的存储与访问(即数据管理)是传感器网络研究首当其冲要解决的问题.

对于用户而言所关心的是感知数据, 而不是传感器节点本身及其构成的网络. 用户希望通过简单的描述性查询请求来获取网络中的数据, 而根本不会去关心网络底层是如何实现数据存储与访问, 所以无线传感器网络中数据管理的最终目的是在异构的、不可靠的网络中支持高效、可靠的数据存储与访问, 并且能够充分利用节点有限的资源, 为用户提供低延时的服务. 数据存储主要研究感知数据如何有效地在网络中存放以使用户方便、快捷地获得感知数据; 而数据访问主要是指结合有效的存储方法, 高效、节能地实现查询处理.

本文组织结构如下: 第二部分详细综述了传感器网络中各种数据存储策略; 第三部分重点分析了传感器网络中的分布式数据存储以及相应的数据访问方法; 第四

部分详述了传感器网络中的查询处理,具体包括查询分类,查询处理模型以及查询处理优化策略;最后给出全文总结.

2 无线传感器网络中数据存储

无线传感器网络中的数据存储研究节点产生的感知数据在网络中的存储策略,包括如何将数据存储在网络中合适的位置以及查询请求如何路由到存储位置获取到数据.实际上这是一个信息中介(Information Brokerage)过程.所谓信息中介是指生产者(网络中传感器节点)将产生的感知数据按照某种策略存放在特定的位置上,而消费者(可能是基站,也可能是传感器节点)将数据访问请求按照相应的策略路由到相关数据的存储位置,然后满足查询条件的结果反馈给消费者.依据感知数据存储策略不同,数据存储可分为集中式存储、本地存储、分布式存储和传感器网络数据库.下面分别论述这四种策略,然后对其数据存储和访问代价进行分析.

2.1 集中式存储

集中式存储^[5-8]是一种最简单的数据存储策略,每个节点将收集到的感知数据传输到基站(汇节点)存储,而数据访问直接从基站获取数据.由于基站的能量和存储空间不受限制,数据可以长时间保存,而且数据访问不会消耗网络中节点的能量.此时传感器网络只是作为一种数据收集而不是数据处理的手段,因为用户只能从基站数据库中获得数据.此外,当网络规模很大且节点分布密集时,网络中大量的数据需要传输,靠近基站的节点会因转发数据而消耗能量太快,对整个网络构成瓶颈,故不适合大规模网络.

2.2 本地存储

本地存储^[5-8]是指节点产生的感知数据存储在该节点自身的存储器中,而数据访问请求被路由到所有节点去获取相关数据.该策略将查询请求“泛洪”到整个网络中,各节点依据查询条件反馈结果.其优点是数据存储简单,存储过程中没有任何通信开销,而且数据访问是一种按需查询.其缺点如下:首先,节点存储能力有限,不能长时间保存历史数据,一旦节点发生故障,数据将会丢失;其次,采用“泛洪”路由,查询请求盲目地在网络中传播,网络因为耗能太大而寿命缩短,不适用于查询请求发生频繁的网络;最后,数据传输代价高,查询处理较复杂.

2.3 分布式存储

分布式存储^[8-18]是一种以数据为中心的存储策略,其核心思想是节点产生的感知数据不一定存储在本地,而是利用分布式技术将数据存储在其他节点,并采用有效的信息中介机制来协调数据存储和数据访问之间的关系,保证数据访问请求能够被满足.在此策略下,

数据按照特定的存储机制存放,而查询请求也依据特定的访问机制来获取数据.这些机制包括:哈希映射、建立索引、数据和查询请求按一定规则路由等.其优点是:分布式数据存储较好地吻合传感器网络本身的分布性,而且信息中介机制能够保证数据访问请求被满足,缺点是信息中介需要额外的代价.

2.4 传感器网络数据库

传感器网络数据库^[7,19-26]集以上三种策略为一体,把传统的数据库技术、分布式技术、网络技术紧密结合,把传感器节点视为感知数据流或感知数据源,把无线传感器网络视为分布式感知数据库,从逻辑概念和软、硬件技术实现一个高性能的以数据为中心的传感器网络数据库系统^[4].传感器网络数据库和以数据为中心的路由互补,路由相对于数据存储与访问是自底向上的机制,而数据库相对数据建模和访问是自顶向下的机制.典型的传感器网络数据库包括 COUGAR^[19-21]、TinyDB^[22,23]、PRESTO^[24]、StonesDB^[25].

2.5 近似代价分析

下面对数据存储与访问的代价进行近似分析.假设网络中 n 个节点以网格状均匀分布,网络的直径为 $O(\sqrt{n})$;通信代价和传输路径长度成正比,单位数据从网络中任一个节点传送到基站的平均代价为 $O(\sqrt{n})$;相对于通信代价,计算代价忽略不计;网络中数据产生速率为 R_{Data} ,查询发生速率为 R_{Query} .表 1 给出各种策略的代价比较.

表 1 各种存储策略代价比较

存储方式	存储代价	访问代价	单个节点最大代价
集中式存储	$R_{Data}O(\sqrt{n})$	0	$R_{Data}O(n)$
本地存储	0	$R_{Query}O(n) + R_{Query}O(n\sqrt{n})$	$R_{Query} + R_{Query}O(n)$
分布式存储	$R_{Data}O(s, n\sqrt{n})$	$R_{Query}O(n/s) + R_{Query}O(n\sqrt{n}/s)$	$R_{Data}O(n) + R_{Query}$

集中式存储:所有节点都发送数据到基站,而数据访问在基站完成,其代价可忽略不计,故全部代价为 $R_{Data}O(n\sqrt{n})$,其中基站同时收到所有节点的数据,故单个节点(基站)最大代价为 $R_{Data}O(n)$.

本地存储:由于数据存储在本地故存储代价为零,但查询请求不能确定数据存储的具体位置,必须发送到每个节点,其代价为 $O(n)$;若网络中所有节点都满足查询条件,反馈一次结果的代价为 $O(n\sqrt{n})$,故全部代价为 $R_{Query}O(n) + R_{Query}O(n\sqrt{n})$.当每个节点都有数据反馈时,单个节点(基站)的最大代价为 $R_{Query} + R_{Query}O(n)$.

分布式存储:由于数据存储到 s 个位置,故存储代

价为 $R_{\text{Data}}O(s, n\sqrt{n})$, 查询请求必须发送这 s 个位置中的任何一个, 其代价为 $R_{\text{Query}}O(n/s)$, 若某个节点满足查询条件, 反馈结果的代价为 $R_{\text{Query}}O(\sqrt{n})$. 当数据存储和查询访问相交的单个节点的最大代价为 $R_{\text{Data}} \cdot O(n) + R_{\text{Query}}$.

3 分布式数据存储与访问

3.1 分布式数据存储分类

我们依据文献[8~18]中数据存储与访问所采用的不同信息中介机制, 对分布式存储进行如下分类:

(1) 依据数据存储过程中是否建立索引可分为无索引存储和有索引存储. 无索引存储是指数据在分布式存储过程中不建立索引结构, 例如位置哈希 GHT^[8], 即节点产生的数据利用哈希函数映射到网络中的某一位置存储, 而数据访问同样映射到该位置来获取数据. 有索引存储是指节点产生的感知数据不论存储在本节点还是存储在其它节点, 数据之间都建立索引, 数据访问利用索引来获取相关的数据, 例如 SCOOP^[9], DIM^[10], DIMENSIONS^[11], DIFS^[12], TSAR^[13].

(2) 依据数据存储是否保留副本可分为单点存储和多点存储. 单点存储是指将感知数据存储在网络中某一固定位置, 而不进行备份存储. 多点存储是指在网络中多个位置存储数据的副本. 多点存储的一种方式是通过结构化复制将数据采用镜像的方式存储在网络中多个位置, 例如 GHT^[8]; 另一种方式是路由过程中数据在经过的路径上保留备份. 例如 Combs^[16], Cross-Line^[17], Double Ruling^[17], Landmark^[18] 等.

(3) 依据存储过程中数据存储位置是否调整可分为固定存储和动态存储. 前者是指数据的存储位置一旦确定就不发生改变, 例如 GHT^[8], DIM^[10], DIMENSIONS^[11], DIFS^[12], TSAR^[13] 等; 后者是指数据的存储位置依据网络的各种参数变化而动态调整, 例如 SCOOP^[9], Combs^[16], Cross-Line^[17], Double Ruling^[17], Landmark^[18] 等.

(4) 依据存储过程中是否对节点划分层次可分为扁平式存储和层次型存储. 通常情况下, 网络中各个节点地位相同, 数据和索引信息均匀地存储在各个节点上, 构成一种扁平式存储, 例如 GHT^[8], Combs^[16], Cross-Line^[17], Double Ruling^[17], Landmark^[18]. 而另一种情况是对网络中各个节点进行划分层次, 底层节点存储数据, 而高层节点存储元数据, 例如 DIM^[10], DIMENSIONS^[11], DIFS^[12], TSAR^[13] 等.

3.2 分布式数据存储与访问分析

GHT^[8] (Geographic Hash Table) 采用基于属性的命名, 将感知数据属性集命名为事件, 借助于 P2P 系统的

DHT(Distributed Hash Table) 思想, 通过位置哈希将事件映射为网络中的存储位置, 然后采用基于位置的路由协议 GPSR^[27] 将数据存储到映射的位置. 查询请求通过对所包含事件进行哈希映射直接路由到相应的位置获取数据. 为避免节点故障造成数据丢失, 可以采用结构化复制进行多点存储. 其缺点是: (1) 要求节点知道自己的位置. 因为数据存储与访问需要基于位置的路由协议 GPSR^[27] 的支持; (2) 一种盲目的数据存储策略, 如果数据产生频繁而查询请求稀少, GHT 的存储代价很高.

DIM^[10] 不仅采用特殊性质的哈希函数来确定数据的存储位置, 而且建立 k-d 树索引来支持多维范围查询. 它首先将多属性事件通过具有局部保持特征的哈希函数映射到一个二维空间的位置区域, 并且每个区域都有一个节点负责存储映射到此区域的数据, 然后利用 k-d 树在位置区域间建立索引, 利用索引可以高效地支持范围查询等数据访问. DIM 与 GHT 不同之处在于: 映射过程中属性值相近的事件存储在相邻的区域. DIM 核心是以数据为中心的存储和位置局部保持哈希映射. 由于 DIM 底层利用路由协议 GPSR^[27], 所以需要知道节点的位置信息. 此外, 维护索引结构比较困难.

DIMENSIONS^[11] 利用数据压缩和索引技术, 提供多分辨率的数据存储与访问. 在时间维上, 感知数据是时间序列, 利用小波变换对数据进行压缩存储; 在空间维上, 采用分布式四分树将节点组织成“金字塔”型的层次存储结构, 最底层叶子节点存储自己的数据, 而其节点不仅存储自身的数据, 而且还存储其子节点的压缩后的数据. 由于节点存储能力有限, 每个节点按照一定的老化规则丢弃旧的数据. 查询首先从较高层节点获得粗粒度的描述, 然后采用数据挖掘中的“下钻”(drill down) 技术到底层节点获得细粒度的详实数据. 它以牺牲数据的保真度(fidelity)为代价, 用较低的成本存放了大范围感知数据的粗略统计特征值. 其缺点是计算复杂, 顶层节点构成网络的瓶颈.

DIFS^[12] 利用位置哈希和层次索引, 通过在各节点间建立特殊的类似四分树的索引结构来支持高效的范围查询. 其特殊性在于每个非根节点有多个父节点, 而四分树中每个非根节点只有一个父节点. 每个节点存储一定地理区域的感知数据并且数据的值有一定的范围限制, 层次结构中高层节点存储的数据的值域范围较小但代表的地理区域较大, 而底层节点存储的数据的值域范围较大但代表的地理区域较小. 虽然建立索引要考虑感知值的大小和节点位置, 但是因为有多父节点, 所以健壮性好于四分树, 而且能够在各个节点中均衡负载. 其缺点是由于有多父节点, 索引维护比较困难, 而且哈希函数的设计也有特殊要求.

TSAR^[13] 是针对层次型网络结构设计的存储策略,

因为这样的网络中有一些特殊的、资源几乎不受限制的代理节点。TSAR 将数据分为原始数据和元数据(即描述感知数据特征的信息),普通节点产生的感知数据存储在本节点,并将该数据的元数据存放在邻近本节点的代理节点,然后通过 ISG(Interval Skip Graph)在代理节点之间建立全局分布式索引,用来提供所有数据的全局逻辑视图和有效地支持时空查询和范围查询。其优点是:数据和元数据分别存储,对于一些统计查询在代理节点就可以获得查询结果,而不需要去节点获取原始数据;而且索引的健壮性好。缺点是感知数据发生变化时需要及时地更新元数据,保持数据一致性比较困难。此外数据存储过程中还可引入其它索引结构,例如环状索引^[14], ZONE SHARING^[15]等。

SCOOP^[9]针对上述策略没有考虑到网络中信息中介的动态性,一旦数据存储位置确定就不再发生变化的特点,综合数据产生速率、查询发生速率以及网络拓扑变化信息,按照“数据尽量存储在查询需要的地方”原则,计算数据在网络中的最优存储位置,动态地调整存储位置。SCOOP 不采用哈希映射和索引,而是由基站定期地去收集相关的信息,计算出数据存储位置表 SAT(Storage Assignment Table),然后广播给各个节点,各个节点依据 SAT 存储数据。数据访问依据 SAT 到相关的节点直接获得数据。该策略在多基站和多查询的条件下非常有效,缺点是基站负荷较大,而且扩展性差,因为基站要定期收集所有节点的信息。

数据不一定存储在某一固定的节点,而是可以按照一定的路径来存储,而查询请求也按照一定的路径传播,这样只要这两条路径相交,查询就能够得到解答。这种思想最早起源于路由协议 Rumor^[28],即消费者和生产者都按照随机路径在网络中游走,一旦二者发生相交,就可以对路径进行修正和改进。依据这种思想,传感器网络中一种最简单的数据存储与访问策略是 Cross-Line^[17],即生产者将产生的数据沿着水平方向传播并且在经过的路径上保留副本,而消费者发布的查询请求沿着垂直方向传播,这样消费者就能够在两条路径相交的节点上获得所需的数据。这种策略虽然浪费一些存储空间,但是是一种距离敏感的数据存储与访问策略,因为若消费者和生产者的距离比较近,则查询请求传播比较短的路径就可以和数据存储路径相交。其缺点是要求网络是规则的。

Combs^[16]突破了对规则网络的要求,数据(或查询请求)不仅仅沿着一条路径传播,而是沿着多条路径传播,这样就增加了数据传播路径和查询请求传播路径相交的概率。数据可以首先沿着垂直方向传播,然后沿着水平方向具有一定间隔的多条路径同时传播,并且在经过的路径上保留副本,而查询请求只需沿着垂直方向传

播便能够和数据存储路径相交。当然这个过程也可以相反,即查询请求沿着多条路径传播,这取决于数据产生速率和查询发生速率。该策略整个思想类似于在用梳子在干草堆里寻找针,缺点是数据(或查询请求)传播的开销太大。

Double Ruling^[17]利用平面上的点和球面上的点存在一一映射以及球面上任意两个通过球心的圆总会相交的性质来完成数据存储与访问,其中一个圆代表生产者存储数据的轨迹,而另一个圆表示消费者传播查询请求的轨迹。该策略首先将传感器网络中的节点映射为球面上的点,然后数据沿着网络中经过生产者的某一闭合曲线存储,此曲线对应于球面上生产者轨迹投影到网络中所对应的曲线,而数据访问时查询请求沿着球面上消费者轨迹投影到网络平面中所对应的曲线传播,这样能够保证二者至少有一个交点。该策略优点是:(1)距离敏感,这由映射的性质来保证;(2)便于数据聚合,消费者沿任何圆周传播一圈,就可以和所有的生产者相交,完成数据聚合;(3)双环结构能够保证良好的健壮性。

Landmark^[18]是针对网络中只有部分节点位置信息可知,而其它节点位置信息不能获得的情况下的数据存储与访问策略。其思想是将位置信息可知的点作为路标(landmark),每个节点选择距离自己最近的位置可知的节点作为自己的路标,并利用 Voronoi 图将整个网络划分成若干个片,其数量与路标的数量相同;然后利用 CDT(Combinatorial Delaunay Triangulation)图来表示网络的拓扑结构。数据存储与访问主要是通过数据和查询请求采用不同的路由策略来实现。片内局部路由对于数据传播而言,节点利用虚坐标计算自己到附近路标的距离,选择邻近的三个路标同时进行数据传播,相当于数据以一个点为中心,在四条路径上备份。片内局部路由对于查询传播而言,沿着“之”字型路径传播,同样对刚才选择的三个路标依次传播,这样能保证数据存储路径和查询请求传播路径相交。

3.3 小结

本节全面总结了无线传感器网络中分布式数据存储的研究进展,并进行分析比较(见表2)。虽然各种存储策略各有利弊,但数据存储目的是为数据访问提供方便的途径,所以数据存储策略应该满足三个条件:(1)存储过程中通信代价小;(2)高效地支持数据访问;(3)能够提供良好的存储能力和长时间的数据存储。

4 无线传感器网络中查询处理

4.1 查询处理概述

无线传感器网络中查询处理方法包括:集中式方法和网内处理方法^[6,7,20-23,26]。前者所有的查询处理均在基站完成,后者将查询处理从基站延伸到传感器节点,

表 2 各种分布式存储策略特征

策略	数据	数据存储	数据访问	索引	层次	副本	动态性
GHT	完全分布	位置哈希	位置哈希	无	无	结构化复制	无
DIM	完全分布	位置哈希 更新索引	依据索引	K-D 树	有	结构化复制	无
DIMENSION	完全分布	局部存储 更新元数据	依据索引	四分树	有	压缩副本	无
DIFS	完全分布	位置哈希 更新索引	依据索引	类四分树	有	无	无
TSAR	完全分布	局部存储 更新元数据 更新索引	代理查询 依据索引	Interval Skip Graph	有	元数据副本	无
SCOOP	完全分布	计算最优 存储位置 SAT	依据 SAT	无	无	无	动态调整
Cross-Line	完全分布	水平方向或 垂直方向	垂直方向或 水平方向	无	无	传播路径上保留副本	有
Combs	完全分布	梳子状或针状	针状或梳子状	无	无	传播路径上保留副本	有
Double Ruling	完全分布	闭合曲线	闭合曲线	无	无	传播路径上保留副本	有
Landmark	完全分布	一点发散出 四条路径	“之”字型	无	无	传播路径上保留副本	有

在底层路由协议的支持下, 不同节点以不同角色承担不同任务, 相互协作地完成查询处理。相对于集中式方法, 网内处理具有如下特点:

(1) 资源受限。不论是存储能力还是处理能力, 无线传感器网络都不能和分布式数据库相媲美, 而能量是传感器网络中最宝贵的资源, 查询处理必须尽量减少能量消耗。

(2) 分布式计算。传感器节点组成一个分布式系统, 各个节点相互协作来完成查询处理任务。这里的协作既包括本节点不同感知物理量的协同信号处理, 也包括节点间的分布式信息处理。

(3) 数据聚合^[21, 23 31~35]。数据聚合的作用是压缩数据, 减少通信量, 从而减少能量消耗。数据聚合保持应用的透明性, 处于网络层与数据链路层之间, 并可以和其它协议层内的数据融合技术共存。

(4) 近似结果^[32, 36~45]。查询处理可以利用感知数据具有一定的时空冗余性来获取近似结果。时间冗余上利用历史数据的趋势、变化来预测将来的数据; 空间冗余上利用邻居节点的值来近似代替本节点的值。

4.2 查询的表示方法和分类

查询是用来获取用户感兴趣的数据的一种数据访问方式。虽然各种查询的表示方法略有差异, 但都必须满足以下四点: (1) 查询能够表达时空特性, 即查询结果可以报告何时何地发生了何种事件; (2) 查询不仅能够指定网络中的节点, 而且还能指定要查询的物理量; (3) 查询的表示方式是描述性的, 网络底层分布式计算

对用户是透明的; (4) 用户通过查询可以管理网络。

现有的传感器网络数据库^[20, 23]中查询的表示方法使用类似于 SQL 语句的描述性语言, 基本框架由 `select from where groupby having` 组成, 而且都支持选择、投影、分组、连接、聚合操作(包括 MAX, AVG, MIN, COUNT, SUM)。与传统 SQL 语言的不同之处在于引入 DURATION、EVERY^[20] 或 SAMPLE PERIOD、FOR^[23] 等子句来支持连续查询(周期性查询)。特别地, 传感器网络数据库将感知数据视为一张只能增加的虚关系表 SENSORS, 系统以预先指定的周期将元组追加到表中。虚表的含义是指该表在节点中并不永久存在, 只有查询请求时才产生表中的元组和属性。表的每列表示一种属性, 或者是传感器节点的属性(节点标志、位置等), 或者是感知数据的属性(温度、湿度、气压等)。

无线传感器网络的查询可以分成如下几类:

(1) 快照查询(Snapshot Queries)^[20, 23]: 一般用来获取给定时刻指定节点的感知数据, 通常不包括聚合。

(2) 连续查询(Continuous Queries)^[20~23]: 用户提交查询请求后, 传感器网络以一定的时间间隔周期性地 将查询结果以数据流的形式反馈给用户。

(3) 事件驱动查询(Event-Driven Queries)^[22]: 类似于数据库中的触发器, 当网络中有查询请求或操作系统定义的事件发生时, 会自动触发传感器节点去获取感知数据。此外还可以定义事件发生后应采取的行动。

(4) 基于生命周期查询(Lifetime-Based Queries)^[22]: 有些情况下用户可能更关心网络的生命周期, 查询请

求只需指定网络的生命周期,由无线传感器网络去决定采样频率,然后采取合适的查询处理策略。

(5) 连接查询(Join Queries)^[29,30]:传感器网络中 SENSORS 表和其它表进行连接操作,也可以通过定义存储点在存储点之间或存储点和 SENSORS 表之间进行连接操作。存储点在 TinyDB 中通过指定部分子窗口实现^[22];而在 COUGAR 中采用视图节点来实现^[21]。

(6) 聚合查询(Aggregation Queries)^[21,23,31-35]:首先对感知数据进行分组,然后求解表示聚合特性的值,例如平均、最大、最小值等。由于连续查询需要长时间的运行,用户关心的并不是某些个别值,而是一些具有统计意义的值,所以连续查询中通常会包含分组聚合操作。

(7) 其它高级查询:查询还可完成复杂的数据分析任务,例如 Top-k 查询^[47],窗口查询^[48],阈值监测^[49,50],异常检测^[51],Skyline 查询^[52],KNN 查询^[53]等。

4.3 查询处理模型

传感器网络中感知数据是一定时空范围的感知物理量的表示,对物理量的建模方式不同,获取感知数据所采用的查询模型也不同。目前感知数据的建模方式包括:有限状态机模型、概率模型、关系模型。下面分别论述这些模型的查询处理方式。

有限状态机模型是一种事件驱动模型,主要对传感器节点本身的状态进行建模,不同的状态对应不同的感知数据。当网络中用户感兴趣的事件发生或系统预设的定时器到期,节点在不同的状态之间转换,并将相应的数据传送到基站。以温度传感器为例,节点在 SLEEP \leftrightarrow ACTIVE \leftrightarrow HOT 三种状态间转换,当没有数据处理时节点进入 SLEEP 状态,在定时器的触发下,节点由 SLEEP 转换到 ACTIVE,一旦感知到温度超过一定的阈值,节点转换到 HOT 状态,并将此事件的相关信息发送到基站。

概率模型将感知数据的属性通过概率分布函数描述,然后应用相应的数学模型来进行访问。GADT^[36]将感知数据固有的不确定性表示为连续的概率密度函数,然后用高斯分布函数对感知数据建模,并将索引结构应用到模型中来访问数据。IDSQ^[37]利用二维高斯概率模型对目标位置预测,将测量模型和噪音模型结合在一起减少目标位置的不确定性。文献[38]在 TinyDB 查询处理基础上,加入统计特性确信度,对所有感知属性的概率分布建模,提出一种 BBQ 的查询方法来支持近似查询和过滤噪声数据。文献[39]引入概率模型来管理感知数据,并利用数据相关性填补缺失数据和去除噪音。文献[40]通过感知属性的相关性利用访问代价低的属性来推导代价高的属性。

关系模型(即数据库模型)是将传感器网络视为分布式数据库,并扩充传统数据库的语义在传感器网络

中实现获取、过滤、聚合、连接等操作元语。因为每个感知数据和时间相关,所以传感器网络数据库是一个序列数据库。在数据库模型中,查询处理组件一般由两部分组成:基站端组件和节点端组件。基站端组件分析用户的查询请求,生成相应的查询计划,分布到相关的传感器节点。查询完成后把反馈结果存放在数据库中,并以图形的形式显示给用户。节点端组件主要按照查询计划完成网内查询处理,即相关的节点获取感知数据,并缓存从其它节点接收到的数据,进行数据融合后将结果发送出去。

4.4 查询处理过程及优化

传感器网络中查询处理首先需要底层路由协议的支持,这里假设底层已经建立路由树来支持查询访问。查询发布的过程是自顶向下,根节点将查询请求向孩子节点传送,孩子节点采用广播方式继续向它的孩子节点发送,直至发送到叶子节点;而结果收集的过程是自底向上,首先是叶子节点把结果发送到父节点,父节点继续向上发送,直至结果反馈到发起查询请求的根节点。

查询请求被发送到节点后,由节点端的查询处理器或查询代理来负责执行。查询处理包括两个阶段^[46]:预处理阶段和执行阶段。预处理阶段主要检查查询请求的合法性和为查询执行做准备工作。虽然合法性检查工作大部分是在基站端完成的,但由于网络的动态性,基站端不可能及时拥有所有节点的信息,所以部分合法性检查工作转移到各个节点。准备工作主要是为查询执行建立内部数据结构和分配必要的存储空间。

查询执行一般分为四个阶段:启动阶段、操作算子执行阶段、结果传送阶段和状态转换阶段。在每一轮开始,查询进入启动阶段,传感器的感知部件收集数据,然后依据查询计划中的操作算子执行顺序对感知数据进行运算,并将结果通过路由树传送,传送完毕后节点通过状态转换阶段进入休眠状态。若没有结果传送,直接进入状态转换阶段,将节点由活动状态转入休眠状态。

为了能够节省能量,查询处理过程中系统必须权衡各种代价产生一个查询计划。查询计划给不同的结点分配不同的角色以承担不同的任务来执行查询,以及调度不同节点进行数据通信。若不进行调度,节点不知道何时开始接收邻近节点发送的数据,大部分时间处于侦听状态,消耗了宝贵的能量。所以查询处理过程中要尽量采用各种优化策略,减少通信代价,节省能耗。下面总结各种查询处理优化策略。

(1) 分时间片调度节点^[22,23]

基于路由树的分时间片调度策略是:依据树的深度将每轮时间分成若干时间片,时间片的大小为每轮

时间除以树的深度. 节点依据自己在路由树上的层次来决定通信的时间. 在每个时间片内只有两层节点处于活动状态, 底层处于发送状态而上层处于接收状态. 这种调度的优点: 每轮时间内每个节点只转发一次数据包(包括自己的感知数据), 而不是多次转发底层节点的数据包; 而且每个周期只产生一个结果, 非常适合聚合操作. 缺点是必须保持严格的时间同步, 而且延时比较大.

(2) 流水线调度^[22, 23]

流水线技术是将一个复杂的时序过程分解为若干过程, 而每一个子过程都可以有效地在其专用的功能过程上与其它过程同时执行. 采用流水线技术调度各层节点, 在每个时间片内树上各层节点同时传输数据, 但不是同一轮的数据, 上层节点的数据比下层节点早一轮, 这样充分利用路由树和流水线技术提高系统的吞吐率. 缺点是数据传输时延比较大, 要等待一段时间流水线才能满载.

(3) 连接操作的查询优化^[29, 30]

假设关系 R 和感知数据表 SENSORS 进行连接操作. 最原始的方法是将 SENSORS 传送到基站完成连接操作, 缺点是大量不满足条件的数据都传送到基站. REED^[29]利用分布式连接操作技术对网络中的感知数据进行过滤, 将连接操作放在节点上完成, 并给出相应的优化措施. 即将 R 传送到节点和满足条件的感知数据进行连接操作, 然后将结果发送到基站. 当 R 中元组选择性很低时, 即大量的感知数据不满足连接条件, 此方法非常有效. 对于感知数据的自连接操作, 文献[30]讨论了如何在传感器网内进行自连接操作, 并给出窗口发生重叠时自连接操作的优化措施.

(4) 多查询优化

所谓的多查询是指在传感器网络中同时运行多个查询请求. 多查询优化策略包括查询共享、节点调度、数据缓存等.

查询共享^[23, 45]: 对于多个连续的持久性查询, 将每个查询分解为操作序列, 提取序列中相同的部分, 应用于感知数据并产生结果, 然后将结果传递给不同的子查询, 达到查询共享目的. 此外还可以对序列的操作顺序进行优化, 自主地调整多个查询操作序列中操作的次序.

节点调度^[21, 22]: 若网络中同时有多条链路传输数据, 可能由于争用信道而产生冲突, 调度所有的节点以提前预定的次序传输, 间隔一定距离的一组节点向相同的方向传输, 不仅避免了冲突, 而且增加了数据传输的并发性, 同时减少能耗. 因为每个节点大部分时间处于休眠状态, 只有在预先确定的调度周期中才处于活动状态, 其缺点是传输延时大.

数据缓存^[23, 31, 43, 44]: 利用节点的存储能力缓存一些获取代价高的数据. 由于数据的冗余性, 可以用缓存的数据来代替重新获取数据. 此外, 感知数据可以主动地存储到网络中的某些节点, 数据访问时直接从这些节点获取数据.

(5) 数据聚合^[21, 23, 31~35]

由于传感器网络是多跳路由, 网路中节点可以对接收到的数据依据查询计划进行过滤和聚合, 这样能够提高数据的准确性和节省网络的传输能量. 传感器网络网内聚合操作主要包括数据包合并和部分聚合.

COUGAR^[21]提出了在传感器网络上进行聚合操作的可扩展算法, 其聚合操作是在数据传送过程中由头节点完成. TAG^[23]应用数据库技术实现了在低能源、分布式无线传感器网络环境下的数据聚合函数. 通过底层路由建立生成树, 树中父节点对子节点的数据进行聚合. TiNA^[31]是在 TAG 的基础上以牺牲数据准确性为代价, 对历史数据进行缓存, 依据新旧数据的差别是否大于一定的阈值来确定是否传送数据. 文献[32]给出在 TAG 上聚合操作的近似结果. ODI^[33]提出了一种多路由传输条件下避免重复计算的框架, 不仅能有效地进行数据聚合, 同时给出中间结果的概要(Synopsis). 文献[34]全面分析了数据聚合的质量和网络的能量消耗程度之间的关系. 文献[35]从理论上分析了节点随机分布得传感器网络中最优的数据聚合方式.

(6) 利用模型进行优化^[42~45]

这种技术基于数据的相关性和冗余性建立预测模型, 利用历史数据来预测未来的数据. 其实质是通过计算代价来换取通信代价, 减少通信所消耗的能量. 文献[41]在保证数据误差在一定范围之内的前提下, 采用主成份分析对数据建立模型, 通过调整预测模型的参数来进行数据压缩和查询优化. 文献[42]采用线性回归模型对感知数据进行预测. 文献[43]利用同一节点的不同感知物理量之间的相关性和冗余性, 从历史数据中提取其特征值, 然后应用线性相关性对数据进行预测. Snapshot^[44]用局部数据来预测整体数据, 即通过局部环境模型来选取网络中代表性的节点, 这些代表性节点构成网络的快照模型, 然后用代表性节点给出查询的近似结果. 文献[45]利用贝叶斯模型来推测失效节点的感知数据.

(7) 其它优化策略^[47~54]

针对不同的数据分析任务应用不同的优化策略来减少查询处理的能量消耗, 从而达到延长网络生命期的目的. 值得一提的是查询处理和数据路由相结合^[54]是常用的优化方法之一.

4.5 小结

传感器网络中查询处理及各种优化策略的共同目

的是减少通信量,节省能耗。常用的途径包括:减少数据访问过程中传输数据包的个数和大小;进行科学合理的节点调度和时间同步减少不必要的能耗,使节点在没有数据传输时进入低功耗状态;利用数据的相关性和冗余性获取近似结果;在查询处理过程中采取有效的数据聚合策略等。

5 结论与展望

传感器网络是以数据为中心的网络,数据的存储与访问是传感器网络研究的重要问题。数据存储主要研究感知数据如何在网络中存放,而数据访问主要研究对感知数据进行查询处理,二者相辅相成。数据存储的最终目的是为数据访问提供方便的途径。本文对传感器网络中数据存储与访问的研究进展进行了全面的分析和总结。

今后,数据存储领域将呈现如下几个方向的研究趋势:

(1) 数据存储过程中的索引结构将更加高效、复杂。从简单的哈希映射,到复杂的 K-D 树,再到 Skip Graph,相信将来会有更复杂的索引结构应用到传感器网络数据存储中。

(2) 信息中介机制将更加灵活。由简单的位置哈希,到数据和查询请求按照不同的路径进行路由和新型路由构建方法^[55],再到数据和查询请求按照多条不同的路径进行同时路由,但最终目标将是数据存储路径和查询请求传播路径相互交叠。

(3) 数据存储将更加安全可靠。数据存储的位置由一点变位多点,使得数据存储能够应对传感器网络的不稳定性,而且分布式存储能够提供相对于单个结点的更大的存储能力。

(4) 数据压缩和数据融合。在数据存储过程中,利用概率模型和小波变换来对数据压缩存储,减少存储空间,延长存储期,预计将来会有其它压缩算法和数据融合方法应用到数据存储中。

(5) 查询请求的发起点将由基站转移到网内的任何节点,数据存储应该能够满足这种网内并非基站发起的数据访问请求。此外,查询的发起点由基站一点变成网络中多个节点同时发出查询请求。

数据访问将结合有效的存储方法,高效、节能地实现查询处理。由于传感器网络本身的特点,所以其查询的表示以及处理过程均有其特殊性,而且最重要的是节省能量。今后主要的研究方向包括:充分利用基站强大的计算能力来对查询处理进行全局优化,生成能量有效的查询计划;利用结点的存储能力和计算能力来尽量减少不必要的数据传输,从而减少结点的通信代价;利用数据的相关性和冗余性来获取近似结果和确

定数据的推拉(Pull-Push)策略;查询处理向着复杂的数据分析发展,从简单查询到聚合查询,再到复杂的查询,例如 Top-k, KNN, Skyline 等,相信将来数据分析、数据挖掘均会应用到传感器网络中。

由于传感器网络中数据存储与访问的研究论文比较多,本文对该方面研究进展进行了综述,希望起到抛砖引玉的作用。随着传感器网络应用面的不断扩展,传感器网络中数据存储与访问的重要性也日渐凸现。虽然目前已经有些原型系统部署到实验环境中,但离真正的实际应用还有距离,很多技术问题有待解决。就传感器网络中数据存储与访问而言,仍然有很大的研究和空间。相信随着研究的不断深入,无线传感器网络最终将会融入人类的生活,实现真正的普适计算。

参考文献:

- [1] I F Akyildiz, W Su, Y Sankarasubramanian, E Cayirci. Wireless sensor networks: a survey [J]. Computer Networks, 2002, 38(4): 393-422.
- [2] 孙利民, 李建中, 陈渝, 朱红松. 无线传感器网络[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
Sun L M, Li J Z, Chen Y, Zhu H S. Wireless Sensor Network [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005. (in Chinese)
- [3] S Tilak, N B Abur-Ghazaleh, W Heinzelman. A taxonomy of wireless micro sensor network models [J]. Mobile Computing and Communications Review, 2002, 1(2): 1-8.
- [4] 李建中, 李金宝, 石胜飞. 传感器网络及其数据管理的概念、问题与进展 [J]. 软件学报, 2003, 14(10): 1717-1727.
Li J Z, Li J B, Shi S F. Concepts, issues and advance of sensor networks and data management of sensor networks [J]. Journal of Software, 2003, 14(10): 1717-1727. (in Chinese)
- [5] S Shenker, S Ratnasamy, B Karp, R Govindan, D Estrin. Data centric storage in sensornets [J]. ACM SIGCOMM Computer Communications Review, 2003, 33(1): 137-142.
- [6] D Ganesan, B Greenstein, D Estrin, J Heidemann, R Govindan. Multi resolution storage and search in sensor networks [J]. ACM Transactions on Storage, 2005, 1(3): 277-315.
- [7] C Intanagonwiwat, R Govindan, D Estrin, J S Heidemann, F Silva. Directed diffusion for wireless sensor networking [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2003, 11(1): 2-16.
- [8] S Ratnasamy, B Karp, S Shenker, D Estrin, R Govindan, L Yin, F Yu. Data centric storage in sensornets with GHT, a geographic hash table [J]. Mobile Networks and Applications, Special Issue on Wireless Sensor Networks, 2003, 8(4): 427-442.
- [9] T M Gil, S Madden. Scoop: an adaptive indexing scheme for stored data in sensor networks [A]. Proceedings of IEEE ICDE [C]. Istanbul, Turkey, 2007. 89-102.
- [10] X Li, Y J Kim, R Govindan, W Hong. Multi dimensional

- range queries in sensor networks [A]. Proceedings of ACM SENSYS [C]. Los Angeles, California, USA, 2003. 63–75.
- [11] D Ganesan, D Estrin, J Heidemann. DIMENSIONS: Why do we need a new data handling architecture for sensor networks? [J]. Computer Communication Review, 2003, 33(1): 143–148.
- [12] B Greenstein, D Estrin, R Govindan, S Ratnasamy, S Shenker. DIFS: a distributed index for features in sensor networks [A]. Proceedings of IEEE SNPA [C]. Anchorage, Alaska, USA, 2003. 163–173.
- [13] P Desnoyers, D Ganesan, P Shenoy. TSAR: a two tier sensor storage architecture using interval skip graphs [A]. Proceedings of ACM SENSYS [C]. San Diego, California, USA, 2005. 39–50.
- [14] W S Zhang, G H Cao, T L Porta. Data dissemination with ring based index for wireless sensor networks [A]. Proceedings of IEEE ICNP [C]. Atlanta, Georgia, USA, 2003. 305–314.
- [15] M Aly, N Morsillo, P K Chrysanthis, K Pruhs. Zone sharing: a hot spots decomposition scheme for data centric storage in sensor networks [A]. Proceedings of DMSN [C]. New York, NY, USA: ACM, 2005. 21–26.
- [16] X Liu, Q Huang, Y Zhang. Combs, needles, haystacks: balancing push and pull for discovery in large scale sensor networks [A]. Proceedings of ACM SENSYS [C]. Baltimore, Maryland, USA, 2004. 122–133.
- [17] R Sarkar, X Zhu, J Gao. Double rulings for information brokerage in sensor networks [A]. Proceedings of ACM MOBICOM [C]. Los Angeles, California, USA, 2006. 286–297.
- [18] Q Fang, J Gao, L J Guibas. Landmark-based information storage and retrieval in sensor networks [A]. Proceedings of IEEE INFOCOM [C]. Barcelona, Catalunya, SPAIN, 2006. 1–12.
- [19] P Bonnet, J Gehrke, P Seshadri. Towards sensor database systems [A]. Proceedings of ACM MDM [C]. Hong Kong, China, 2001. 3–14.
- [20] Y Yao, J Gehrke. The cougar approach to in network query processing in sensor networks [J]. SIGMOD Record, 2002, 31(3): 9–18.
- [21] Y Yao, J Gehrke. Query processing for sensor networks [A]. Proceedings of CIDR [C]. Asilomar, California, USA, 2003.
- [22] S Madden, M J Franklin, J M Hellerstein, W Hong. TinyDB: an acquisitional query processing system for sensor networks [J]. ACM Trans. on Database Systems, 2005, 30(1): 122–173.
- [23] S Madden, M J Franklin, J M Hellerstein, W Hong. TAG: a tiny aggregation service for ad hoc sensor networks [A]. Proceedings of OSDI [C]. Boston, Massachusetts, 2002. 131–146.
- [24] M Li, D Ganesan, P Shenoy. PRESTO: feedback driven data management in sensor networks [A]. Proceedings of ACM/USENIX NSDI [C]. San Jose, California, USA, 2006. 311–324.
- [25] Y L Diao, D Ganesan, G Mathur, P Shenoy. Re thinking data management for storage centric sensor networks [A]. Proceedings of CIDR [C]. Asilomar, California, USA, 2007. 410–419.
- [26] W Shi, S Sellamuthu, K Sha, L Schwiebert. Query agent: a general query processing tool for sensor networks [A]. Proceedings of IEEE ICPPW [C]. Montreal, Quebec, Canada, 2004. 488–495.
- [27] B Karp, H T Kung. GPSR: greedy perimeter stateless routing for wireless networks [A]. Proceedings of ACM MOBICOM [C]. Boston, Massachusetts, USA, 2000. 243–254.
- [28] D Braginsky, D Estrin. Rumor routing algorithm for sensor networks [A]. Proceedings of WSNA [C]. Atlanta, Georgia, USA, 2002. 22–31.
- [29] D J Abadi, S Madden, W Lindner. REED: robust, efficient filtering and event detection in sensor networks [A]. Proceedings of VLDB [C]. Trondheim, Norway, 2005. 769–780.
- [30] X Y Yang, H B Lim, M T Zsu, K L Tan. In network execution of monitoring queries in sensor networks [A]. Proceedings of ACM SIGMOD [C]. Beijing, China, 2007. 521–532.
- [31] J Beaver, M A Shaaf, A Labrinidis, P K Chrysanthis. Power aware in network query processing for sensor data [A]. Proceedings of HDM [C]. Athens, Hellas, 2003. 1–17.
- [32] J Considine, F Li, G Kollios, J Byers. Approximate aggregation techniques for sensor databases [A]. Proceedings of IEEE ICDE [C]. Boston, Massachusetts, USA, 2004. 440–460.
- [33] S Nath, P B Gibbons, S Seshan, Z R Anderson. Synopsis diffusion for robust aggregation in sensor networks [A]. Proceedings of ACM SENSYS [C]. Baltimore, India, 2004. 250–262.
- [34] A Manjhi, S Nath, P B Gibbons. Tributaries and deltas: efficient and robust aggregation in sensor network streams [A]. Proceedings of ACM SIGMOD [C]. Baltimore, Maryland, USA, 2005. 287–298.
- [35] R Zheng, R Barton. Toward optimal data aggregation in random wireless sensor networks [A]. Proceedings of IEEE INFOCOM [C]. Anchorage, Alaska, USA, 2007. 249–257.
- [36] A Faradjian, J E Gehrke, P Bonnet. GADT: a probability space ADT for representing and querying the physical world [A]. Proceedings of IEEE ICDE [C]. San Jose, California, USA, 2002. 201–211.
- [37] M Chu, H Haussecker, F Zhao. Scalable information driven sensor querying and routing for ad hoc heterogeneous sensor networks [J]. The International Journal of High Performance Computing Applications, 2002, 16(3): 293–313.
- [38] A Deshpande, C Guestrin, S Madden. Model driven data acquisition in sensor networks [A]. Proceedings of VLDB [C].

- Toronto, Canada, 2004. 588– 599.
- [39] D Chu, A Deshpande, J Hellerstein, W Hong. Approximate data collection in sensor networks using probabilistic models [A]. Proceedings of IEEE ICDE[C]. Atlanta, Georgia, USA, 2006. 48.
- [40] A Deshpande, C Guestrin, W Hong, S Madden. Exploiting correlated attributes in acquisitional query processing [A]. Proceedings of IEEE ICDE[C]. Tokyo, Japan, 2005. 143– 154.
- [41] I Lazaridis, S Mehrotra. Capturing sensor generated time series with quality guarantees [A]. Proceedings of IEEE ICDE[C]. Bangalore, India, 2003. 429– 440.
- [42] C Guestrin, P Bodik, R Thibaux, M Paskin, S Madden. Distributed regression: an efficient framework for modeling sensor network data [A]. Proceedings of IEEE IPSN[C]. Berkeley, California, USA, 2004. 1– 10.
- [43] A Deligiannakis, Y Kotidis, N Roussopoulos. Compressing historical information in sensor networks [A]. Proceedings of ACM SIGMOD[C]. Paris, France, 2004. 527– 538.
- [44] Y Kotidis. Snapshot queries: towards data centric sensor networks [A]. Proceedings of IEEE ICDE[C]. Tokyo, Japan, 2005. 131– 142.
- [45] A Silberstein, A Gelfand, K Munagala, G Puggioni, J Yang. Making sense of suppressions and failures in sensor data: a Bayesian approach [A]. Proceedings of VLDB[C]. Vienna, Austria, 2007. 842– 853.
- [46] J Gehrke, S Madden. Query processing in sensor networks [J]. Pervasive Computer, 2004, 3(1): 46– 55.
- [47] A Silberstein, R Braynard, C Ellis, K Munagala, J Yang. A sampling based approach to optimizing top-k queries in sensor networks [A]. Proceedings of IEEE ICDE[C]. Atlanta, Georgia, USA, 2006. 68.
- [48] Y Xu, W Lee, J Xu, G Mitchell. Processing window queries in wireless sensor networks [A]. Proceedings of IEEE ICDE[C]. Atlanta, Georgia, USA, 2006. 70.
- [49] R Keralapura, G Cormode, J Ramamirtham. Communication efficient distributed monitoring of thresholded counts [A]. Proceedings of ACM SIGMOD[C]. Chicago, Illinois, USA, 2006. 289– 300.
- [50] A Silberstein, K Munagala, J Yang. Energy efficient monitoring of extreme values in sensor networks [A]. Proceedings of ACM SIGMOD[C]. Chicago, Illinois, USA, 2006. 169– 180.
- [51] S Subramaniam, T Palpana, D Papadopoulos, V Kalogeraki, D Gunopulos. Online outlier detection in sensor data using non-parametric models [A]. Proceedings of VLDB[C]. Seoul, Korea, 2006. 187– 198.
- [52] H K Chen, S G Zhou, J H. Guan. Towards energy efficient skyline monitoring in wireless sensor networks [A]. Proceedings of EWSN[C]. Delft, Netherlands, 2007. 101– 116.
- [53] S H Wu, K T Chuang, C M Chen, M S Chen. DIKNN: an itinerary based knn query processing algorithm for mobile sensor networks [A]. Proceedings of IEEE ICDE[C]. Istanbul, Turkey, 2007. 456– 465.
- [54] 龚海刚, 刘明, 陈力军, 谢立. DEED: 一种无线传感器网络中高效节能的数据通信协议 [J]. 电子学报, 2005, 33(8): 1391– 1396.
Gong H G, Liu M, Chen L J, Xie L. Distributed energy efficient data gathering in wireless sensor networks [J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(8): 1391– 1396. (in Chinese)
- [55] H K Chen, S G Zhou, B Xiao, J H Guan, B. Huang. A novel energy-efficient backbone for sensor networks [A]. Proceedings of MSN[C]. Hong Kong, China, 2006. 600– 611.

作者简介:



蔚赵春 男, 1981 年出生于内蒙古四子王旗, 博士研究生. 主要研究领域为高级数据管理和无线传感器网络.

E-mail: zcyu@fudan.edu.cn



周水庚 男, 1966 年出生于江西, 教授, 博士生导师. 主要研究领域为数据库, 数据挖掘, P2P 计算, 传感器网络和生物信息学.

E-mail: szhou@fudan.edu.cn



关洁红 女, 1969 年出生于湖北, 教授, 博士生导师. 主要研究领域为空间数据挖掘, 信息检索, P2P 计算, 传感器网络和地理信息系统.

E-mail: jhguan@mail.tongji.edu.cn