

能量高效的无线传感器网络时空查询处理算法

刘 亮¹,秦小麟¹,戴 华¹,严伟中²,潘锦基¹

(1. 南京航空航天大学 信息科学与技术学院, 江苏南京 210016; 2. 苏州大学计算机科学与技术学院, 江苏苏州 215006)

摘 要: 在无线传感器网络环境中,用户经常提交的查询是时空查询,如“获得区域 A 在某个给定时间段内的感知数据”。由于传感器节点能量十分有限,因此,能量高效的时空查询处理是目前亟需解决的问题。首先指出了现有的时空查询处理算法能量消耗大的原因在于查询协调节点选择不合理。然后给出了理论上最优的查询协调节点的位置及其证明,并基于该理论提出了一类能量高效的传感器网络时空查询算法 ECSTA。最后通过实验分析了节点密度和查询区域大小对算法能量消耗的影响。理论和实验结果表明 ECSTA 算法优于现有的 STWin 框架下的算法。

关键词: 无线传感器网络; 查询处理; 时空查询; 查询协调节点

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2010) 01-0054-06

An Energy-Efficient Spatio-Temporal Query Processing Algorithm in Wireless Sensor Networks

LIU Liang¹, QIN Xiao-lin¹, DAI Hua¹, YAN Wei-zhong², PAN Jin-ji¹

(1. College of Information Science & Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China;

2. School of Computer Science & Technology, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China)

Abstract: In wireless sensor networks, most of the queries submitted by users are spatio-temporal queries such as “gathering the data in region A during a specified period of time”. Since the sensor nodes have very limited power supply, energy-efficient spatio-temporal query processing is an urgent problem to be resolved at present. In this paper, we point out that the existing algorithms have high energy consuming due to unreasonable query coordinator node. Then, we derive the theoretical optimal location of the query coordinator node and propose a class of energy-efficient spatio-temporal query processing algorithms called ECSTA based on the theory. Finally, the influence of node density and query region size on energy consumption is studied experimentally. Theoretical and experimental results show that our algorithms outperform the existing algorithms in the STWin framework.

Key words: wireless sensor networks; query processing; spatio-temporal query; query coordinator node

1 引言

无线传感器网络是以数据为中心的网络,用户使用传感器网络的主要目的是查询其感知的数据。大部分用户提交的查询是与时间、空间相关的时空查询,如获得南京长江大桥近一个月内的车流量信息,玄武湖的温度分布等。但目前绝大多数查询处理的研究集中于对整个网络部署区域数据(如温度,湿度等)的查询,如: Cougar^[1], TinyDB^[2]等。而对只关注网络局部区域数据的时空查询的研究较少。文[3]综述了无线传感器网络数据存储与查询处理的研究进展。Comman 等人在文[4]中针对采用本地存储方式的传感器网络,提出了一个将时空查询分为两阶段处理的通用框架 STWin(Spatio-Temporal WINDOW Framework)及该框架下的两种算法:STWin-Flood 和 STWinDepth。相比传统的泛洪式算法(FullFlood),这两种算法仅将查询消息发送到查询区域

内的节点而无需在整个网络内广播,减少了能量的消耗。实验证明,在多数情况下,前两种算法的能量消耗均小于泛洪式算法,仅在查询区域较大、网络节点密度较小的情况下,泛洪式算法才较优。文[5]给出了三种算法能量消耗的近似公式和理论推导。文[6]利用传感器节点冗余和感知数据的空间相关性,对 STWin 第二阶段进行了改进,通过减少冗余数据的发送以降低能量的消耗。文[7]中指出在不同查询的数目、事件发生的概率、节点密度、事件类型数目的条件下,应采取不同的数据存储方式,并提出了基于 CM-DCS(center mapping data centric storage)的时空查询处理方法。对于适于采用以数据为中心存储的网络,该方法更优。文[8]提出了一种基于路线(itinerary-based)的空间范围查询算法 IWQE。它先将查询发送到查询区域内,然后沿查询区域内的一条路线进行查询分发、感知数据收集和聚集,最后将聚集后的结果返回至查询发起节点。文[9]利用节点冗余解决

了 IWQE 算法中的节点失效和查询线路不连通问题. 文 [10, 11] 研究了连续近似聚集查询. 考虑到在许多现实应用中, 用户能够接受查询结果有误差. 利用节点感知数据具有时间相关性, 提出了一种自适应的设置节点误差配额的算法 (setting error budgets), 以减少感知数据的发送. 文 [8~11] 中的算法适用于空间范围聚集查询 (如查询某一区域的平均温度), 但对于一些需要收集空间范围内所有数据的应用 (如获得大桥各点的压力值), 这些算法的能量消耗较大.

本文研究感知数据存储于本地的时空查询处理, 解决了目前尚未解决的能量最优的查询协调节点问题, 给出了理论上能量最优的查询协调节点的位置及其证明, 并基于该理论提出了更优的时空查询处理算法. 实验结果表明: 在绝大多数情况下, 本文提出的算法优于现有的算法.

2 相关研究及分析

时空查询 $STQ(sw, tw)$ 可以表示为 $SELECT * FROM sensors Where sensors.pos IN sw AND sensors.timestamp IN tw$. 其中, pos 为节点的位置, $timestamp$ 为感知数据产生的时间, sw 为一矩形查询区域, tw 代表查询时间窗口. 该查询的语义为获得 sw 区域内所有节点在 tw 时间段内的感知数据. 由于数据通信消耗的能量远大于处理器处理数据消耗的能量, 时空查询算法优化目标在于使得数据通信量最小.

2.1 基本时空查询处理算法 FullFlood

采用 TinyDB^[2] 的方法处理时空查询, 相当于 FullFlood^[4] 方法, 即查询发起节点将时空查询消息泛洪到网络内的所有节点, 查询区域内的节点收到查询消息后, 将查询结果按查询消息泛洪阶段形成的自己到查询发起节点的最短路径 (hop 数意义上的最短路径) 返回至查询发起节点. 该方法的优点是各节点的查询结果能按最短路径返回, 而其缺点是将大量查询消息发送到不在查询区域内的节点, 导致大量不必要的能量消耗.

2.2 STWin 框架及其算法

为了克服 FullFlood 算法的问题, 文 [4] 提出了 STWin 框架及其对应算法 STWinFlood 和 STWinDepth. 它将传感器网络时空查询处理过程分为两个阶段:

(1) 利用位置路由算法 (如 GPSR^[12]) 将查询消息发送到查询区域内的查询协调节点 (query coordinator node). 文 [4] 按以下规则选择查询协调节点: 若查询区域中心存在节点, 则将该节点作为查询协调节点; 若查询区域中心不存在节点, 则选择距查询区域中心最近的节点. 如图 1 所示, s 为查询发起节点, qc 为查询协调节点, w_r 为通信半径, 按位置路由查询消息的路径为:

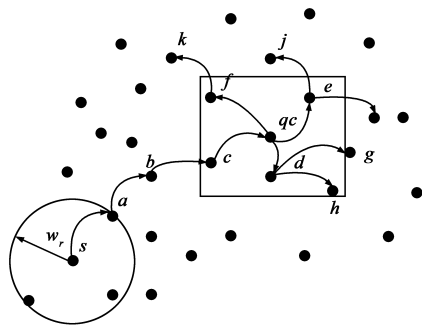
$$s \rightarrow a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow qc.$$


图1 STWin框架

(2) 查询协调节点将查询消息转发到查询区域内的每个传感器节点, 然后收集查询区域内所有传感器节点的数据, 最后按第一阶段发现的路由路径将查询结果返回至查询发起节点.

第二阶段采用不同的查询分发方式对应不同的算法. STWinFlood 采用泛洪分发方式. 它利用了无线通信的广播特性, 使得查询能快速的分发到查询区域内. STWinDepth 采用深度优先分发方式. 相比 STWinFlood, 优点是查询处理过程只涉及两个节点之间的通信, 减小了多查询引起的消息碰撞的概率, 有利于多个查询同时执行. 但它的缺点是分发查询的时间较长且查询结果返回查询协调节点的路径较长, 能量消耗大.

STWin 框架下的算法仅向查询区域内的节点发送查询消息, 克服了传统方法的缺点, 但查询协调节点的选择没有严格的理论依据. 事实上, 查询区域中心节点并不是能量最优的查询协调节点 (使算法能量消耗最小的查询协调节点). 如图 1 所示, 以 STWinFlood 算法为例, 若以节点 c 为查询协调节点, 将查询消息发送到 c 消耗的能量小于发送到 qc 消耗的能量. 在 c 点广播查询消息到查询区域内的所有节点与在 qc 点广播消耗的能量相等. 节点 f, d 的查询结果能不通过 qc 中转而直接经过 c 点返回. 受 d 点的影响, 返回 g, h 查询结果消耗的能量也会减少. 因此, c 点相比 qc 消耗的能量更少.

STWin 框架下的算法查询协调节点选择不当, 导致查询区域内的许多节点 (如 c, f, d) 将查询结果返回查询发起节点过程中存在反向路由, 即这些节点需要将查询结果沿自己到查询发起节点的反方向路径发送到查询区域中心节点, 再返回至查询发起节点, 而不是沿自己到查询发起节点的方向将查询结果发回查询发起节点, 这样势必增加能量的消耗. 尤其当查询区域逐渐变大时, 存在反向路由的节点增多, 反向路由的路径变长, 使得算法性能显著下降. 考虑查询区域包含 s 、网络节点密度较小的特殊情况, STWinFlood 分发查询消耗的能量与 FullFlood 近似相等, 但 FullFlood 的查询结果均按最短路径 (hop 数) 返回, 使得 FullFlood 优于 STWinFlood.

3 能量高效的传感器网络时空查询算法

为了减少时空查询算法的能量消耗,应合理选择查询协调节点.下面给出理论上能量最优的查询协调节点.为了便于理论分析,先作以下假设与定义:假设网络节点同构且均匀分布.节点的传输半径为 W_r .节点能通过 GPS 或定位算法^[13]获得自己的位置信息.所有节点定时广播自己的位置信息,因而各节点能获得所有邻居节点的位置信息.节点的感知数据存储在本地.平均每个节点有 n 个邻居节点, s 为查询发起节点, c 为查询协调节点.查询区域 R 是以 o 为圆心 r 为半径的圆形区域, R 中有 N 个节点.发送和接收 1 个字节消耗的能量分别为 E_t 和 E_r , 并令 $E = E_t + nE_r$. 查询消息的大小为 S_q . 查询区域内各节点的查询结果消息大小相等, 记为 S_a . 任意两节点 a, b 之间的跳数 $Hop(a, b)$ 正比于两点间的距离 $D(a, b)$, 即 $Hop(a, b) = K \times D(a, b)$, 其中 $K = [2\cos(\pi/2n)W_r/3]^{-1}$ 且为一常量^[5]. 从 a 向 b 发送 m 字节的数据消耗的能量为: $m \times K \times D(a, b) \times E$. 一次时空查询消耗的能量为:

$$E_{total}(s, c, R) = E_{s2c}(s, c) + E_{c2R}(c, R) + E_{R2c}(R, c) + E_{c2s}(c, s)$$

其中, E_{total} : 查询处理过程消耗的总能量; E_{s2c} : 位置路由查询消息消耗的能量, 即查询消息从 s 路由到 c 消耗的能量; E_{c2R} : 分发查询消息消耗的能量, 即将查询消息从 c 发送到 R 内所有节点消耗的能量; E_{R2c} : 收集结果消耗的能量, 即将 R 内的所有查询结果收集到 c 消耗的能量; E_{c2s} : 位置路由查询结果消耗的能量, 即将 R 内的所有查询结果从 c 返回 s 消耗的能量.

3.1 能量最优的查询协调节点求解

下面给出采用泛洪方式分发查询情况下能量最优的查询协调节点的求解过程. 采用深度优先方式同理可得. 分两种情况讨论:

(1) 查询发起节点在查询区域内

引理 1 查询发起节点是能量最优的查询协调节点.

证明 反证法. 如图 2 所示. 假设 e 为能量最优的查询协调节点且 $e \neq s$. 显然 $E_{s2c}(s, s) < E_{s2c}(s, e)$. 若按泛洪方式分发查询, 每个查询区域内的节点均要广播一次查询消息, 该节点的所有邻居节点都要接收该消息一次, 因此, $E_{c2R} = N \times E \times S_q$ 为一常量, 即 $E_{c2R}(s, R) = E_{c2R}(e, R)$.

$$E_{R2c}(R, c) + E_{c2s}(c, s) = \sum_{f \in R} [(Hop(f, c) + Hop(c, s)) \times E \times S_a]$$

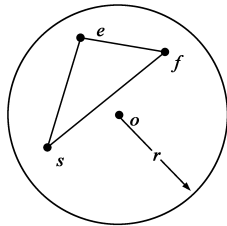


图2 查询发起节点在查询区域内

$$= K \times E \times S_a \times \sum_{f \in R} (D(f, c) + D(c, s))$$

$\forall f \in R, D(f, s) \leq D(f, e) + D(e, s)$ 成立, 则 $E_{R2c}(R, s) + E_{c2s}(s, s) \leq E_{R2c}(R, e) + E_{c2s}(e, s)$, 证毕.

(2) 查询发起节点在查询区域外

引理 2 能量最优的查询协调节点在查询区域的边界上.

证明 反证法, 假设能量最优的查询协调节点不在圆的边界上. 如图 3 所示, 若 e 为能量最优的查询协调节点. 显然

$$E_{s2c}(s, d) < E_{s2c}(s, e) \text{ 且 } E_{c2R}(d, R) = E_{c2R}(e, R) \text{ 成立.}$$

$$\forall f \in R, D(f, d) \leq D(f, e) + D(e, d) \text{ 成立, 则}$$

$$E_{R2c}(R, e) + E_{c2s}(e, s) \geq E_{R2c}(R, d) + E_{c2s}(d, s)$$

因此, 若 d 为查询协调节点时, 查询处理过程消耗的能量必小于 e , 与假设矛盾, 证毕.

引理 3 查询发起节点和查询区域中心连线与查询区域边界的交点 b 是能量最优的查询协调节点.

证明 根据圆的对称性, 以圆边界上的任一节点为查询协调节点, $E_{R2c}(R, c)$ 相等. $E_{c2R}(c, R)$ 为常数, $E_{s2c}(s, c) \propto D(s, c)$ 且 $E_{c2s}(c, s) \propto D(c, s)$. 因此, $D(s, c)$ 越小, 则 E_{total} 越小. 如图 3 所示, 对于所有查询区域边界上的点, $D(s, b)$ 最小. 由此可以得到, b 是圆边界上能量最优的查询协调节点. 再依据引理 2, 证毕.

根据引理 1 和引理 3, 可以得出以下结论:

结论 1 查询区域是圆形时, 当查询发起节点在查询区域内, 查询发起节点是能量最优的查询协调节点; 当查询发起节点在查询区域外, 查询发起节点和查询区域中心的连线与查询区域边界的交点是能量最优的查询协调节点.

由结论 1 可知: 查询区域是圆形时, 能量最优的查询协调节点并不是直观上的位于查询区域中心的节点, 而是查询区域内最靠近查询发起节点的节点. 选择靠近查询发起节点的节点作为查询协调节点, 减少了查询区域内存在反向路由的节点个数, 因而降低了算法的能量消耗.

推广到更一般的情况, 假设查询区域是矩形, 当查询发起节点在查询区域内时, 引理 1 显然成立; 当查询发起节点在查询区域外时, 引理 2 成立, 引理 3 不成立. 但从引理 2 的证明过程可知: 算法若将引理 3 中的节点 b 作为查询协调节点, 则它的能量消耗必优于以查询区域中心节点为查询协调节点的算法. 因此, 可以得出以下结论:

结论 2 查询区域是矩形时, 当查询发起节点在

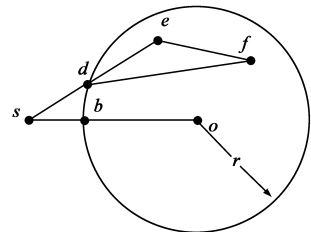


图3 查询发起节点在查询区域外

查询区域内,查询发起节点是能量最优的查询协调节点;当查询发起节点在查询区域外,令以查询发起节点和查询区域中心的连线与查询区域边界的交点为 b ,查询区域中心上的节点为 z ,则 $E_{total}(s, b, R) < E_{total}(s, z, R)$.

结论 2 假设 b 点存在传感器节点,但实际的网络并不一定满足该条件.若 b 点不存在节点,则可以选择查询消息位置路由过程中到达的第一个在查询区域内的节点作为查询协调节点.显然,以该节点为查询协调节点的算法也优于以查询区域中心节点为查询协调节点的算法.

3.2 ECSTA 算法

根据上述思想,我们提出一类能量高效的传感器网络时空查询算法 ECSTA(Energy-optimal query Coordinator node based Spatio-Temporal query processing Algorithm).算法分为四个阶段:第 1 阶段为位置路由查询消息阶段,即利用 GPSR 路由协议将查询消息包发送至查询协调节点;第 2 阶段为分发查询消息阶段,即以查询协调节点为起点,将查询消息包分发到查询区域内的所有节点.第 3 阶段为收集结果阶段,即查询区域内的节点将查询结果返回至查询协调节点;第 4 阶段为返回结果阶段,即查询协调节点将收集到的查询区域内所有节点的查询结果与自己的查询结果合并,形成最终的查询结果,并利用 GPSR 路由协议将其返回至查询发起节点.其中,第 2 阶段可采取不同的查询分发方式,将采用泛洪方式分发查询的算法命名为 EcstaFlood,采用深度优先方式的算法命名为 EcstaDepth.下面给出 EcstaFlood 算法的详细执行过程, EcstaDepth 算法与之类似.

sp : 查询发起节点位置	tw : 时间窗口	sw : 查询区域
-----------------	-------------	-------------

图 4 位置路由查询消息包结构

cid : 查询协调节点 ID 号	sid : 发送该消息包的节点 ID 号	hop : 到查询协调节点的跳数	tw : 时间窗口	sw : 查询区域
---------------------	------------------------	--------------------	-------------	-------------

图 5 泛洪查询消息包结构

第 1 阶段:位置路由查询消息阶段

(1) 查询发起节点 s 收到时空查询 $STQ(sw, tw)$ 后:

(i) 判断自己是否在 sw 内,若是,则 s 为查询协调节点.保存查询信息: $s.sp := s.pos$ ($s.pos$ 表示节点的当前位置, $s.sp$ 保存查询发起节点位置信息), $s.sw := STQ.sw$, $s.tw := STQ.tw$, 转到第 2 阶段;若否,则转到 (ii);

(ii) 初始化查询消息包 qp (格式如图 4 所示):

$qp.sp := s.pos$, $qp.sw := STQ.sw$, $qp.tw := STQ.tw$;

(iii) 利用 GPSR 路由协议将 qp 发送到下一跳节点;

(2) 位置路由过程的中间节点 u 收到查询消息包 qp 后,判断自己是否在 $qp.sw$ 内,

(i) 若是,则 u 为查询协调节点.保存查询信息: $u.sp := qp.sp$, $u.sw := qp.sw$, $u.tw := qp.tw$. 转到第 2 阶段;

(ii) 若否,则利用 GPSR 路由协议将 qp 发送到下一跳节点.

第 2 阶段:分发查询消息阶段

(1) 查询协调节点 c 广播查询消息,过程如下:首先初始化泛洪查询消息包 fp (格式如图 5 所示): $fp.cid := c.id$, $fp.sid := c.id$, $fp.hop := 0$, $fp.sw := c.sw$, $fp.tw := c.tw$, 然后广播消息包 fp ;

(2) 查询区域内的节点 v 收到泛洪查询消息包 fp 后,判断自己是否在 $fp.sw$ 内:

(i) 若是,则判断 $fp.hop + 1$ 是否小于 $v.hop$ ($v.hop$ 在收到泛洪查询消息之前初始化为无穷大).若是,则 $v.hop := fp.hop + 1$, $v.parent := fp.sid$, $fp.sid := v.id$, $fp.hop := fp.hop + 1$, 广播消息包 fp ;若否,则丢弃该消息;

(ii) 若否,则丢弃该消息包;

第 2 阶段完成后,查询区域内的节点形成以查询协调节点为根的一棵树,节点的 hop 值代表在树中的深度, $parent$ 代表该节点的父节点 ID.

第 3 阶段:收集结果阶段

为减少数据收集过程中的消息碰撞,应合理调度节点的收发数据次序.采用文[14]中的基于节点深度的数据收集策略.假设第 2 阶段完成后形成的树的深度为 H .将数据收集过程分为 H 个时间段: $0, 1, \dots, H-1$. 在第 $h(0 \leq h \leq H-1)$ 个时间段内,唤醒深度为 $H-h$ 和深度为 $H-h-1$ 的节点,深度为 $H-h$ 的节点将本地的查询结果和从子节点接收到的查询结果发给深度为 $H-h-1$ 的父节点.第 $H-1$ 个时间段结束后,查询协调节点获得了查询区域内所有节点的查询结果.

第 4 阶段:返回结果阶段

STWin 框架下的算法的查询协调节点将查询结果返回查询发起节点过程依赖于第一阶段建立的从查询发起节点到查询协调节点的路径.当该路径中的一个节点失效时,则查询结果全部丢失.为了避免该问题,查询发起节点利用 GPSR 路由协议发送查询结果到查询发起节点.这样可以不依赖于某条固定的路径,减小数据丢失的概率.该阶段详细流程与第 1 阶段类似.

4 实验

为了对算法进行比较,我们在文[4]的模拟器上实现了本文的算法.实验的硬件环境为 P4(3.0GHz) CPU, 512M 内存;软件环境为 Windows XP 操作系统、VC++

6.0 开发工具. 根据文[15], 无线通信电路发送和接收一位的能量消耗公式为: $E_t = \alpha + \lambda \times d^n$, $E_r = \beta$, 其中, α : 通信发送电路消耗的能量, λ : 传输放大器消耗的能量, d : 传输距离, n : 路径损失因子 (Path loss factor), β : 通信接收电路消耗的能量. 本文采用文[16]中的参数: $\lambda = 10 \text{ pJ/bit/m}^2$, $\alpha = 45 \text{ nJ/bit}$, $\beta = 135 \text{ nJ/bit}$, $n = 2$. 其它参数如表 1^[4]所示.

表 1 实验参数

参数名	参数值
网络覆盖区域	1000m × 1000m
节点通信半径	50m
查询结果大小	8bytes
查询消息大小	24bytes
时间窗口大小	60

实验对不同网络节点密度和矩形查询区域大小情况下, FullFlood、STWinFlood、STWinDepth、EcstaFlood 和 EcstaDepth 算法的能量消耗进行了比较. 详细实验过程如下: (1) 按每一种实验参数, 随机产生 100 个网络; (2) 对生成的每个网络, 随机产生 10 个不同的查询发起节点和矩形查询区域, 形成特定实验参数条件下的 1000 个查询; (3) 对每种算法, 计算各个查询对应的平均节点能量消耗; (4) 对每种算法对应的 1000 个平均节点能量消耗值取平均, 计算出各种算法对应的平均节点能量消耗.

4.1 网络节点密度对能量消耗的影响

矩形查询区域占网络覆盖区域的百分比为 1%. 网络中节点数目分别取 1000、2000、4000、8000、10000、12000 和 14000. 算法的能量消耗如图 6 所示. 可见, EcstaFlood 和 EcstaDepth 均优于传统的 FullFlood 算法, 也分别优于 STWinDepth 和 STWinFlood, 且 EcstaFlood 最优. 经计算, EcstaFlood 消耗的能量相比 FullFlood 和 STWinFlood 分别减少了 71.8% ~ 96.6% 和 4.6% ~ 6.0%.

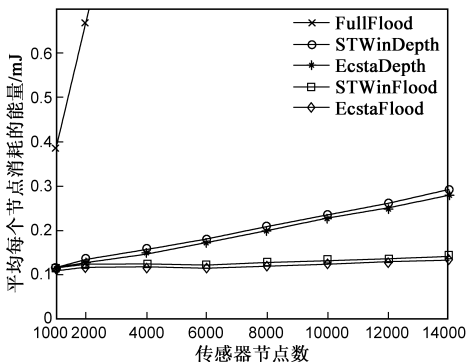


图6 节点密度对能量消耗的影响

4.2 查询区域大小对能量消耗的影响

网络节点数为 2000, 矩形查询区域占网络覆盖区域的百分比分别取 1%、2%、4%、9%、16% 和 25%. 算法的能量消耗如图 7 显示. 可见, EcstaFlood 和 EcstaDepth 分别优于 STWinFlood 和 STWinDepth. FullFlood、STWinFlood 和 EcstaFlood 的查询处理能量消耗近似正比

于查询区域大小, 对这三组实验数据进行线性拟合, FullFlood 与 STWinFlood 的交点以及 FullFlood 与 EcstaFlood 的交点对应的矩形查询区域占网络区域面积百分比分别为 13.77% 和 43.5%. 可见, EcstaFlood 相比 STWinFlood 在更大的查询区域范围内优于 FullFlood.

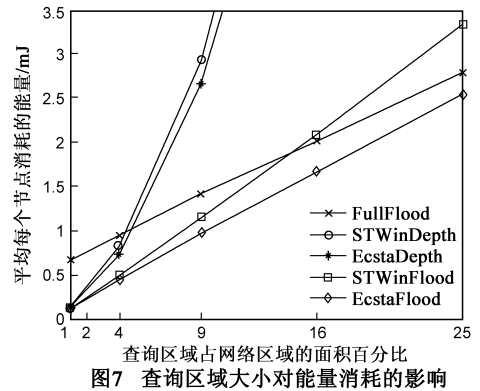


图7 查询区域大小对能量消耗的影响

综合上述实验, EcstaFlood 在多数情况下更优.

5 总结与展望

对于采用本地存储的传感器网络, 查询协调节点的位置与查询分发方式是影响时空查询算法能量消耗的关键因素. 文[4,5]分析了两种不同的查询分发方式对时空查询处理能量消耗的影响, 但没有考虑查询协调节点的位置和其它的查询分发方式. 本文证明了: (1) 当查询发起节点在查询区域内时, 查询发起节点是能量最优的查询协调节点; (2) 当查询发起节点在查询区域外时, 若查询区域是圆形, 则查询发起节点和查询区域中心的连线与查询区域边界的交点是能量最优的查询协调节点; 若查询区域是矩形时, 算法若以该交点为查询协调节点, 它消耗的能量小于现有的 STWin 框架下的算法消耗的能量. 实验结果也验证了上述结论的正确性. 本文没有讨论是否存在能量消耗更小的查询分发方式、哪种查询分发方式是能量最优的查询分发方式以及节点分布不均匀和节点可以调节功率的情况, 这些问题还需要进一步的研究.

致谢 感谢加拿大 Alberta 大学 Alexandru Coman 在算法仿真方面提供的帮助

参考文献:

- [1] Y Yao, J Gehrke. Query processing in sensor networks. Proceedings of the 2003 CIDR Conference[OL]. <http://www-db.cs.wisc.edu/cidr/2003Proceedings.zip>.
- [2] S Madden, M J Franklin, J M Hellerstein, et al. The design of an acquisitional query processor for sensor networks[A]. Proc of the 2003 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data[C]. New York: ACM Press, 2003. 491 - 502.
- [3] 蔚赵春, 周水庚, 关信红. 无线传感器网络中数据存储与

- 访问研究进展[J]. 电子学报, 2008, 36(10): 2001 - 2010.
- Yu Zhao-chun, Zhou Shui-geng, Guan Ji-hong. Data storage and access in wireless sensor networks: a survey[J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(10): 2001 - 2010. (in Chinese)
- [4] A Coman, M A Nascimento, J Sander. A framework for spatio-temporal query processing over wireless sensor networks[A]. Proc of the 1st Int'l Workshop on Data Management for Sensor Networks in Conjunction with VLDB 2004[C]. Washington: IEEE Computer Society, 2004. 104 - 110.
- [5] A Coman, M A Nascimento. An analysis of spatio-temporal query processing in sensor networks[A]. Proc of the 1st IEEE Int'l Workshop on Networking Meets Databases in Conjunction with 21st IEEE Conf. on Data Engineering[C]. Washington: IEEE Computer Society, 2005. 120 - 125.
- [6] A Coman, M A Nascimento, J. Sander. Exploiting redundancy in sensor networks for energy efficient processing of spatiotemporal region queries[A]. Proc of the 14th ACM Conf. Information and Knowledge Management[C]. New York: ACM Press, 2005. 187 - 194.
- [7] 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[J]. 软件学报, 2006, 17(4): 794 - 805.
- Guo Long-Jiang, Li Jian-Zhong, Li Gui-Lin. Spatio-temporal query processing method in wireless sensor networks[J]. Journal of Software, 2006, 17(4). 794 - 805. (in Chinese)
- [8] Yingqi Xu, Wang-Chien Lee, Jianliang Xu, Gail Mitchell. Processing window queries in wireless sensor networks[A]. Proc of the 22nd International Conference on Data Engineering[C]. Washington: IEEE Computer Society, 2006. 70 - 80.
- [9] 刘亮, 秦小麟, 戴华, 沈佳佳. 容忍节点失效的传感器网络空间范围查询算法[J]. 通信学报, 2008, 29(11): 2 - 11.
- Liu Liang, Qin Xiao-Lin, Dai Hua, et al. GSA: node failures tolerant spatial window query processing algorithm in wireless sensor networks [J]. Journal on Communications, 2008, 29(11): 2 - 11. (in Chinese)
- [10] N Jain, P Yalagandula, Michael Dahlin, et al. Self-tuning, bandwidth-aware monitoring for dynamic data streams[A]. Proc of the 22nd International Conference on Data Engineering[C]. Washington: IEEE Computer Society, 2009. 114 - 125.
- [11] N Jain, M Dahlin, Y Zhang, et al. STAR: self-tuning aggregation for scalable monitoring[A]. Proc of the 33rd International Conference on Very Large Data Bases[C]. Washington: IEEE Computer Society, 2007. 962 - 973.
- [12] B Karp, H T Kung. GPSR: greedy perimeter stateless routing for wireless networks[A]. Proc of the 6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking[C]. New York: ACM Press, 2000. 243 - 254.
- [13] Wei Xi, Jizhong Zhao, Xue Liu, et al. EUL: An efficient and universal localization method for wireless sensor network[A]. Proc of 29th IEEE International Conference on Distributed Computing Systems[C]. Washington: IEEE Computer Society, 2009: 433 - 440.
- [14] S Madden, M J Franklin, J M Hellerstein, W. Hong. Tag: a tiny aggregation service for ad-hoc sensor networks[A]. Proc of 5th Symposium on Operating Systems Design and Implementation[C]. New York: ACM Press, 2002. 131 - 146.
- [15] T Rappaport. Wireless Communications: Principles and Practice[M]. New Jersey: Prentice-Hall Press, 1996.
- [16] Bhardwaj. Power-Aware Systems [D/OL]. http://www.mit.edu/researchgroups/icsystems/pubs/theses/manishb_sm_2001.pdf.

作者简介:



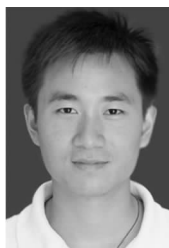
刘 亮 男, 1985 年 11 月出生于江西景德镇市, 在读博士研究生. 2005 年在西北工业大学获得工学学士学位. 目前主要从事传感器网络数据库、流数据库的研究.

E-mail: liangliu@nuaa.edu.cn



秦小麟 男, 1953 年 6 月出生于江苏省南京市, 现为南京航空航天大学信息科学与技术学院教授, 博士生导师. 主要研究方向分布式环境数据管理与容灾、安全数据库、时空数据库等.

E-mail: qinxcs@nuaa.edu.cn



戴 华 男, 1982 年 1 月出生于江苏省盐城市, 在读博士研究生. 分别于 2004 和 2007 年获得南京航空航天大学工学学士和硕士学位. 目前主要从事安全数据库、可生存性技术的研究.

严伟中 男, 1977 年 9 月出生于江苏省常州市, 常州工学院计算机工程学院讲师, 目前主要从事传感器网络的研究.

潘锦基 男, 1976 年 12 月出生于安徽省歙县, 讲师, 在读博士研究生. 分别于 1998 和 2003 年获得南京航空航天大学工学学士和硕士学位. 目前主要从事移动对象数据库、数据挖掘技术的研究.