

# 一种基于预测的目标跟踪传感器网络数据近似存储查询策略

胡升泽 谢 羿 包卫东 封孝生 葛 斌

(国防科学技术大学信息工程重点实验室 长沙 410073)

**摘要** 节能问题是传感器网络设计的一个关键问题,在对目标跟踪传感器网络中的目标位置信息进行存储和查询处理时,也必须通过较低的通信代价来降低消息复杂度,从而达到节能的目的。分析了现存的一些数据存储和数据分发的方法,针对 EASE 方法查询误差较大的问题,提出了基于预测的近似查询的存储策略(Prediction-based Energy-conserving Approximate Storage, P-EASE),并就 EASE 方法查询未考虑选择恰当的存储节点的问题,提出了一种基于地理位置的择优查询(Optimal Query)策略。使用半随机步行移动模型和随机路点移动模型进行了仿真实验,比较了 P-EASE 与 EASE 算法的消息量、消息复杂度、平均消息复杂度和查询误差。仿真实验证明, P-EASE 比 EASE 查询更精确、能量更高效。

**关键词** 数据存储,数据分发,位置查询,消息复杂度,目标跟踪传感器网络

**中图分类号** TP393 **文献标识码** A

## Prediction Based Approximate Schema of Data Storage and Query Processing in Object-tracking Sensor Networks

HU Sheng-ze XIE Yi BAO Wei-dong FENG Xiao-sheng GE Bin

(Science and Technology on Information Systems Engineering Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract** Energy efficiency is one of the most critical issues in the design of wireless sensor networks. In object-tracking sensor networks, the data storage and query processing should be energy-conserving by decreasing the message complexity. In this paper, current algorithms of data storage and data dissemination were analyzed. By figuring out the shortcomings of EASE, a Prediction-based Energy-conserving Approximate Storage (P-EASE) was proposed, which reduces the query error of EASE by prediction and enables a geo-based optimal query algorithm to taking into consideration to query the proper storage node. The simulation experiments were conducted with semi-random walk and random waypoint mobility models which compared the overall messages, message complexity, average message complexity and query error to validate that P-EASE is more energy-conserving than EASE and has less query error as well.

**Keywords** Data storage, Data dissemination, Location query, Message complexity, Target-tracking sensor networks

## 1 引言

由具备感知能力、无线通信能力以及信息处理能力的微型无线传感器组成的自组织网络,已成为信息采集、存储、传递的重要手段,通常的无线传感器具有网络覆盖范围广、节点数目多、易部署等特性<sup>[1]</sup>。无线传感器网络在军用民用等许多领域中的一种典型应用是移动目标的跟踪,例如偏远地区(remote area)的野生动物的监视及重要军事区域的非法目标入侵检测等,可以利用一定的存储策略将感知的数据进行存储,然后通过位置查询(location queries)得到目标的实时位置,来实现对移动目标的跟踪<sup>[2]</sup>。

但是,受限于传感器节点的体积和成本,它具有节点能量有限、计算和存储能力有限、通信能力有限、网络动态性强等

局限性<sup>[3]</sup>。由于传感器节点通常是由电池供电,更换传感器电池的代价是相当巨大的,甚至在一些不可达的区域是根本不可能的,因此传感器网络的节能问题是近年来讨论得最多的重点和热点问题之一。

## 2 相关工作

目标跟踪传感器网络是传感器网络的一种,它关注的是目标的定位、跟踪和预测,通常把目标的时间和空间信息作为感知事件来进行存储和查询。现在主要的处理方式可以分为3种。

一是集中式存储<sup>[6-9]</sup>,即一种最简单的数据存储策略,每个节点将收集到的目标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

到稿日期:2013-01-08 返修日期:2013-04-03 本文受国家自然科学基金项目(60903225, 41001260),高等学校博士学科点专项科研基金项目(20114307110008)资助。

胡升泽(1981—),男,博士生,讲师,主要研究方向为传感器网络、信息资源管理, E-mail: springsun. hu@gmail. com; 谢 羿(1984—),男,博士生,主要研究方向为传感器网络中的移动目标跟踪; 包卫东(1971—),男,博士,教授,主要研究方向为军事指挥信息系统; 封孝生(1971—),男,博士生,副教授,主要研究方向为信息安全、信息管理与智能决策; 葛 斌(1979—),男,博士生,讲师,主要研究方向为信息资源管理。

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,同时能够比较方便地进行数据处理<sup>[4,5]</sup>。二是本地存储<sup>[6-9]</sup>,即节点产生的目标感知数据存储在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。近年来,更多的研究集中于以数据为中心的存储(Data-centric storage)和网内(in-network)查询。在 Tiny-DB<sup>[11]</sup> 项目中,Madden 等人就提出了一种基于拉方式的获取查询方法(pull-based acquisitional query processing, ACQP),即通过传感器节点来控制地点、时间以及多久数据将被获取并传递到查询操作节点。在 Cougar<sup>[10]</sup> 项目中,使用了一种混合的 pull-push 平衡的模型,其中传感数据是被推到了一些节点,而查询节点也是从这些节点取得数据从而得到查询结果。除此之外,GHT(Geographic Hash Table)<sup>[9]</sup>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<sup>[12]</sup>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。在此基础上,一些学者通过建立索引存储传感数据,使得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<sup>[13]</sup>、DIM<sup>[14]</sup>、DIMENSIONS<sup>[15]</sup>、DIFS<sup>[16]</sup>、TSAR<sup>[17]</sup>等等。还有一些方法采用数据不一定存储在某一固定的节点,而是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<sup>[18]</sup>,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,产生了一系列方法,如:Combs<sup>[19]</sup>、Cross-Line<sup>[20]</sup>、Double Ruling<sup>[20]</sup>、Land-mark<sup>[21]</sup>等。除此之外,文献[22]提出了一种基于环的网内数据存储方法,解决了其他存储方法的热点问题 and 热区域问题;文献[23]采用了一种 MobiQuery 的时空查询服务来让移动用户查询它周围区域的数据;文献[24]通过健壮的聚合操作来提取传感器网络中的统计信息。

然而,传感器网络的能量节省是传感器网络大规模、长期部署的壁垒,也是亟待解决的热点问题。上述的这些数据存储方法都没有考虑到通过减少目标跟踪传感器网络通信的消息复杂度来实现网络的能量高效。通常的方法是利用休眠和唤醒机制,让尽量少的节点处于活动状态负责跟踪,其他的节点处于休眠状态,并通过唤醒机制来切换负责跟踪的活动节点从而达到节能的目的。例如文献[26,27]中的传感器节点采用周期性的休眠/唤醒机制,只有在目标跟踪的时候才被激活,当目标离开其感知区域的时候就处于休眠状态以保证能量的节省;文献[28]使用的方法是利用一个极低能耗的 preamble 信号对其他的传感器节点进行唤醒;文献[29,30]把传感器进行分簇,簇头通过其簇内节点的感知信息计算目标的位置信息,并将该位置信息作为查询的结果返回;文献[40]提

出了一种自适应目标跟踪协议,即通过设置节点权值来确定节点是否参与目标的跟踪,领导节点根据目标的运动速度来自适应地调整数据报告的频率。

然而最近也出现了一些通过预测、近似或者是特殊的存储策略等来减少存储更新的消息量的方法,以达到节能的目的。例如:文献[31]提出了一种基于预测的方法,即基站预测收集传感器节点的数据并进行预测,将预测结果发回传感器节点,如果传感器节点感知的位置和预测位置不同,则向基站发送位置更新信息。文献[32]提出了一种双预测的方法,即基站和传感器节点保存相同的预测模型,如果传感器节点发现感知的位置与预测的位置发生偏差,则向基站发送位置更新,否则,不需发送更新消息。文献[33]通过发布/订阅的办法来解决连续的位置查询的能量节省问题。文献[34,35]利用查询精度和能量的折中来进行节能,但并没有应用到目标跟踪传感器网络中。文献[25]提出的 EASE 方法利用近似存储的方法,通过牺牲用户可容忍的一定查询精度,采用近似查询的方法来减小消息复杂度,从而达到节能的目的,其基本思想是:查询时,若用户的近似查询能够满足,则由中心存储节点返回近似结果,否则将查询请求转发到本地存储节点进行精确查询;更新时,若目标在近似区域内,则只进行本地更新,否则进行远程更新。EASE 方法<sup>[25]</sup>一定程度上解决了查询和存储的过程中网络代价和能量消耗过高的问题,是第一篇利用近似方法设计能量高效的目标跟踪传感器网络数据存储策略的文章。虽然 EASE 方法提供了一种新的利用近似存储查询实现目标跟踪传感器网络数据管理的办法,但其本身也存在一些问题:

首先,在很多应用场景下,目标的运动并不是无目的和方向的(例如士兵在战场区域的移动或者在火灾地区消防队员的救援行动),由于任务和先决的其他因素,目标的运动在一定程度上是规律的。文献[25]的近似方法虽然考虑到了用户可以容忍一定的位置误差,通过近似查询和精确查询相结合的方式,减少了中心存储节点和本地存储节点以及本地存储节点和传感节点的更新消息量,但简单地以圆形区域作为近似区域,没有考虑到目标可能运动的趋势,然而这种较大的查询误差是可以改变近似估测区域并加入预测机制来减小的。其次,由于中心存储节点是根据目标的标识由 hash 算法产生的,如果查询节点和中心存储节点距离很远但离本地节点较近,那么每次查询节点都要先向中心节点进行查询,中心节点无论是返回查询结果还是转发查询请求,都将产生大量的消息,而本来查询节点可以直接以更近的本地存储节点得到更精细的查询结果,但这会无谓地损失网络代价和目标信息的获取质量。

鉴于 EASE 的问题,本文对上述两个方面进行了改进,提出了一个基于预测的近似查询的存储策略(Prediction-based Energy-conserving Approximate Storage, P-EASE),即在一定精度约束下的近似查询,其结合近似和预测方法来减少目标跟踪网络的通信开销和查询精度;同时提出了一个择优查询策略来减小查询消息的代价,一方面提高了查询的精度,另一方面减小了消息量,从而达到节能的目的。

本文针对 EASE 算法作了两点改进:

(1)利用扇形区域来代替圆形的估测区域,在不增加本地

更新和地理泛洪的消息复杂度的前提下,利用预测的方法来修正由近似查询带来的误差,圆形角为 120 度的扇形可以保证其中任意点到对称轴上的点的距离小于  $r$ ;

(2)提出了择优查询策略,即在中心节点收到远程更新时,判断上次的查询节点距离中心存储节点和本地存储节点更近的节点,并通知查询节点,若需连续查询,继续向距离更近的节点进行查询。

### 3 基于预测的近似查询的存储策略

本节首先讨论目标跟踪传感器网络的网络模型,然后对基于预测的目标数据近似存储查询策略进行详细描述。

#### 3.1 网络模型

传感器网络是由部署在目标区域的大量的静态传感器组成的,假设每个传感器知道自己的位置信息(通过 GPS 或者其他的自定位算法)。文章涉及的传感器网络是分簇组织的双层异构传感器网络,簇头是能力较强的传感器,能够与簇内的其他传感器进行通信,同时能够把传感器的感知信息在本地进行存储。同一个簇内的传感器节点能够协同地对目标进行识别和跟踪,簇头可以通过三角定位法获得目标的位置<sup>[29,30,36]</sup>。传感器节点是按照一定的采样频率对目标的位置进行感知的。系统模型如图 1 所示。

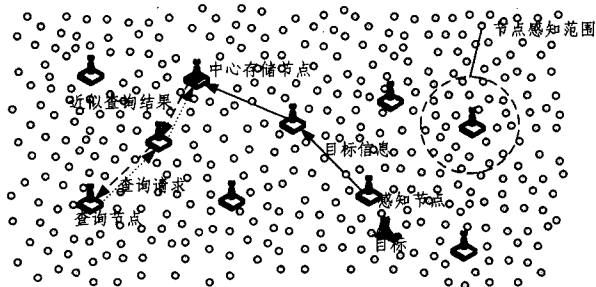


图 1 系统模型概况

基于预测的近似查询的存储策略 P-EASE 是利用感知到的目标的位置  $(x_0, y_0)$ 、平均速度  $v$  以及运动的方向,通过线性趋势预测方法:

$$\begin{cases} x_1 = x_0 + v \cdot \cos(\theta) \cdot \Delta t \\ y_1 = y_0 + v \cdot \sin(\theta) \cdot \Delta t \end{cases} \quad (1)$$

进行预测,并将预测的位置  $(x_1, y_1)$  作为查询结果进行返回。由于 EASE 方法的近似区域是圆形区域,近似查询返回的位置是圆心位置,如果简单加入预测会出现图 2(a)的情况,即:如果将圆心作为目标的近似位置返回,那么不论目标的实际位置在近似估测区域内的哪一点,其误差都不会大于估测区域的半径  $r$ ,但如果返回预测结果,可能出现预测位置与实际位置相差很大的情况(最坏的情况为  $2r$ ),这使得加入预测后在坏的情况下 EASE 本身的查询精度更差。因此可以选用半径为  $r$ 、圆心角为 120 度的扇形作为近似估测区域,如图 2(b)所示,则预测位置永远在沿预测路径方向的射线上,所以不论目标的实际位置在近似估测区域内的哪一点,它与预测位置的误差都不会超过  $r$ 。

很明显,(1)估测区域面积的减小是否会导致更新的频繁,(2)利用扇形作为估测区域并加入预测后,查询平均误差能否减小,这两个问题是本方法无法回避的。第 5 节的仿真实验会对这两个问题进行验证。

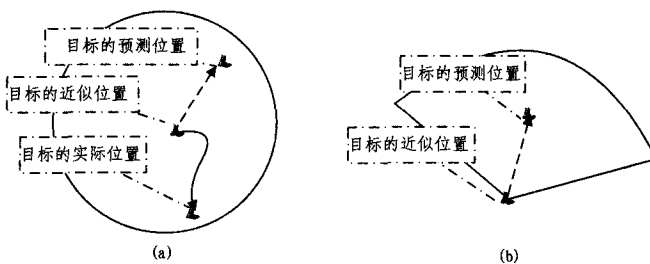


图 2 近似估测区域

#### 3.2 算法详细描述

基于预测的目标数据近似存储查询策略 P-EASE 是通过减少网络的更新消息量来达到节能的目的,感知到的目标信息分为两个版本分别存储在中心存储节点和本地存储节点,即:中心存储节点保存近似的位置信息,而本地存储节点保存目标位置的精确信息。当节点查询目标信息时,根据目标 id 得到中心节点并给出一个能够容忍的误差。如果用户能够容忍的误差大于等于扇形近似区域的半径,则由中心节点根据目标信息预测目标的当前位置,并将其返回给查询节点,如图 3(a)所示。否则转发查询请求到本地存储节点,由本地存储节点根据新的目标信息进行预测,并向查询节点返回查询结果,如图 3(b)所示。如果中心节点预测出的目标当前位置超出了近似区域的范围,但又没有收到来自其他感知节点的远程更新,则利用目标按原方向所能移动的最大位移得到目标的当前位置,即:目标移动方向所在的射线与扇形区域的交点,并将其作为查询结果返回给查询节点,如图 3(c)所示。

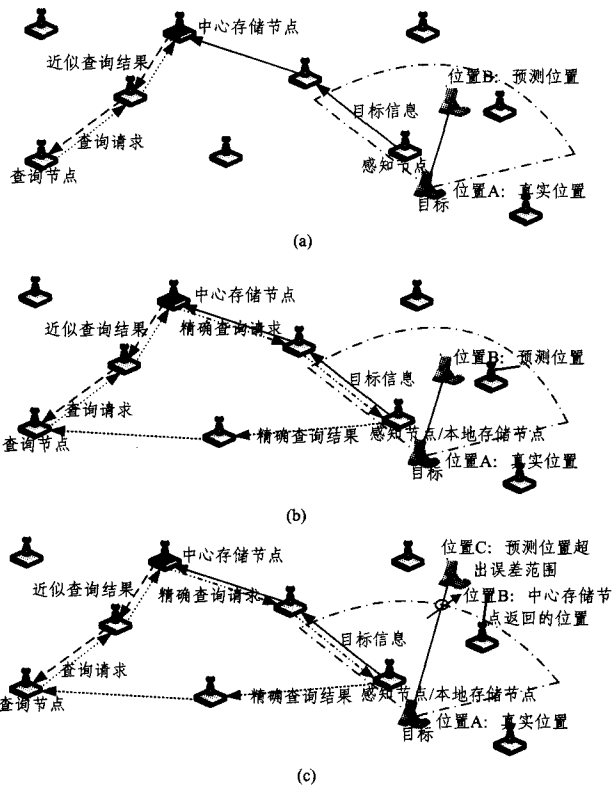


图 3 基于预测的目标数据近似查询策略

当一个感知节点感知到目标之后,首先判断自己是否保存了该目标的本地存储节点,如果是,则只需要向本地存储节点发送本地更新信息即可,如图 4(a)所示;否则,感知节点选举自己成为新的本地存储节点,同时以目标的当前位置为圆

心,以目标的移动方向为对称轴,建立一个圆心角为  $2\pi/3$  的扇形估测区域,并向该区域中节点发送生效通知的地理广播,接收到该地理广播的节点将保存该目标的当前存储节点,如图 4(b)和图 4(c)所示。然后向中心节点发送远程更新消息,并得到目标之前的本地存储节点;若该节点是自己的邻居,则发送一个给原来的本地存储节点,并由它在原来的扇形估测区域中发送失效通知的地理广播,如图 4(b)所示;若该节点不是自己的邻居,则由中心节点负责给原来的本地存储节点发送失效通知,如图 4(c)所示。基于预测的目标数据近似存储策略中心存储节点、探测节点和本地存储节点的算法分别如算法 1、算法 2 和算法 3 所示。

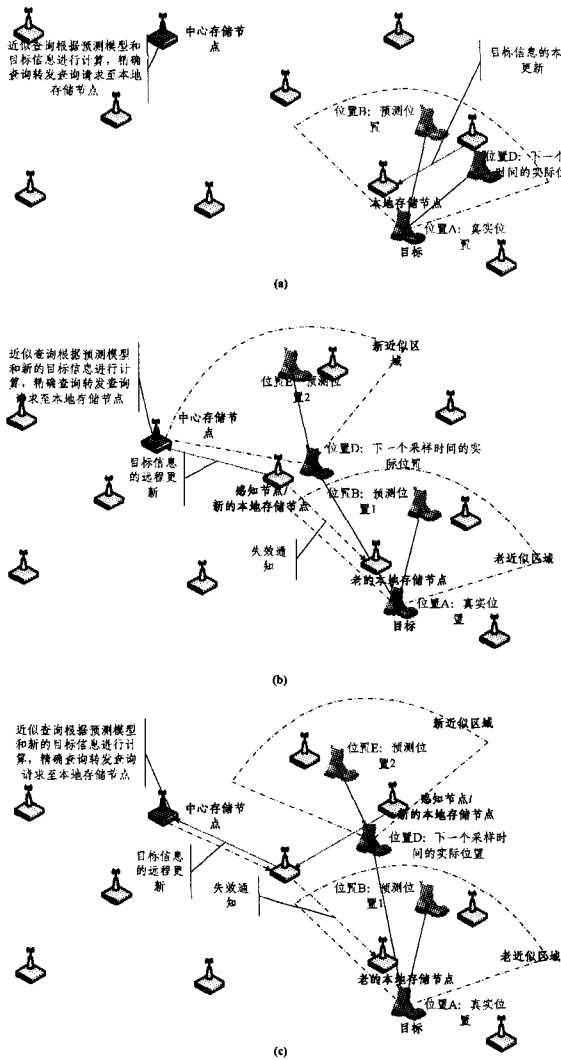


图 4 基于预测的目标数据近似存储策略

#### 算法 1 中心存储节点处理

1. if 接收到查询请求  $\langle \text{object id}; p \rangle$  then
2. if  $p \geq r$  then
3. set  $\text{now\_x} \leftarrow \text{target\_x} + v \cdot \Delta t \cdot \cos(\text{direct})$ ;
4. set  $\text{now\_y} \leftarrow \text{target\_y} + v \cdot \Delta t \cdot \sin(\text{direct})$ ;
5. if  $v \cdot \Delta t > R$
6. set  $\text{now\_x} \leftarrow \text{target\_x} + R \cdot \cos(\text{direct})$ ;
7. set  $\text{now\_y} \leftarrow \text{target\_y} + R \cdot \sin(\text{direct})$ ;
8. end if;
9. return 中心节点存储的近似目标信息
10. end if;

11. if 接收到远程更新消息 then
12. if 新的本地存储节点与原来的本地存储节点无法通信 then
13. 向原来的近似区域发送基于地理泛洪的失效通知;
14. end if;
15. 保存新的本地存储节点和目标近似信息;
16. end if.

#### 算法 2 探测簇头节点处理

1. if 目标  $T$  在近似区域内且本地存储节点已知 then
2. 向本地存储节点发送目标信息本地更新
3.  $T_{\text{info}} = \langle \text{target\_x}, \text{target\_y}, v, \text{direct} \rangle$ ;
4. else
5. 向中心存储节点发送目标信息远程更新
6.  $T_{\text{info}} = \langle \text{target\_x}, \text{target\_y}, v, \text{direct} \rangle$ ;
7. 选自己为本地存储节点;
8. 设置一个新的扇形  $A'$ ; 其圆心为  $T_{\text{info}}$ , 圆心角为  $\theta = 2\pi/3$ ;
9. 半径为  $R$ , 扇形的对称轴为目标的预测方向;
10. if 原来的本地存储节点已知 then
11. 将失效通知发送给原来的本地存储节点;
12. end if;
13. 在  $A'$  中基于地理泛洪发送失效通知"
14. end if.

#### 算法 3 本地存储节点处理

1. if 接收到中心节点转发的查询请求  $\langle \text{object id}; p \rangle$  then
2. set  $\text{now\_x} \leftarrow \text{target\_x\_new} + v_{\text{new}} \cdot \Delta t \cdot \cos(\text{direct\_new})$ ;
3. set  $\text{now\_y} \leftarrow \text{target\_y\_new} + v_{\text{new}} \cdot \Delta t \cdot \sin(\text{direct\_new})$ ;
4. return 将预测位置  $(\text{now\_w}, \text{now\_y})$  返回给查询节点;
5. end if;
6. if 接收到本地更新消息 then
7. 存储当前精确的目标信息;
8. end if;
9. if 接收到需要地理泛洪的失效通知 then
10. 在当前的近似区域  $A$  中通过地理泛洪发送失效通知;
11. end if.

## 4 基于地理位置的择优查询

P-EASE 策略中,查询节点首先向中心存储节点发送查询请求和误差容忍的阈值,中心节点判断这个阈值是否比近似半径大,若是,则直接返回查询结果;否则,转发查询请求至本地存储节点。但是,由于中心存储节点是根据目标的标识由 hash 算法产生的,它的坐标在网络中具有很强的随机性,而查询节点也同样具有随机性,同时目标的出现也是任意的,因此本地存储节点也可能随机地出现在网络中。那就出现了一个很严重的问题,如果查询节点和中心存储节点距离很远但离本地节点较近,那么每次查询节点都要先向中心节点进行查询,中心节点无论是返回查询结果还是转发查询请求,都将产生大量的消息,而本来查询节点可以直接从更近的本地存储节点得到更精细的查询结果,如图 5(a)和图 5(b)所示。所以,在中心节点收到远程更新时,可以判断上次的查询节点距离中心存储节点和本地存储节点更近的节点,并通知查询节点,如果还要查询,请向本地存储节点进行查询,这样就可以大大避免查询请求、查询转发和查询结果可能出现的“舍近求远”的情况。另一方面,也能降低中心节点的查询负载。可以对目标跟踪过程中网络查询消息的减少作一个估测,如图 5(a)所示。原本近似查询消息需要传播的距离是  $l_1 + l_1 =$

$2l_1$ , 精确查询需要传播的路径为:  $l_1 + l_2 + l_3$ , 但当本地存储节点离查询节点更近, 即  $l_1 \geq l_3$  时, 近似查询由精确查询替代, 查询的消息传播距离为  $2l_3$ , 很明显,  $2l_3 \leq 2l_1 \leq l_1 + l_2 + l_3$ 。由于消息复杂度和消息的传播距离直接相关<sup>[25]</sup>, 因此采用择优查询后网络消息量将大大减少。择优查询中本地存储节点和查询节点的详细算法如算法 4 和算法 5 所示。

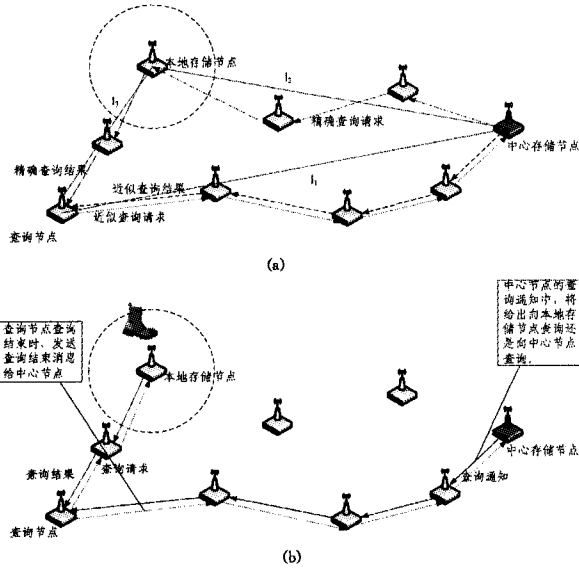


图 5 基于地理位置的择优查询策略

#### 算法 4 中心节点择优查询处理

1. if 接收到来自查询节点  $q$  的查询请求  $\langle \text{object id}, p \rangle$  then
2. if  $\theta(r) < (0.1927 \cdot r/p_{\max} + 0.1875) \cdot \lambda$  且  $\text{distance}(\text{centre}, \text{query}) \geq \text{distance}(\text{local}, \text{query})$  then
3. 向查询节点  $q$  发送通知  $\text{nofiy} = \langle \text{id}_{\text{local}}, x_{\text{local}}, y_{\text{local}} \rangle$ ;
4. set  $\text{notify\_flag}[q] = 1$ ;
5. end if;
6. call 算法 1;
7. end if;
8. if 接收到远程更新消息 then
9. foreach  $q$  in  $\text{notify\_flag}$ ;
10. if  $\text{notify\_flag}[q] = 1$
11. if  $\text{distance}(\text{centre}, q) \geq \text{distance}(\text{local}, q)$
12. 向  $q$  发送通知  $\text{nofiy} = \langle \text{id}_{\text{local}}, x_{\text{local}}, y_{\text{local}} \rangle$ ;
13. else
14. 向  $q$  发送通知  $\text{nofiy} = \langle \text{id}_{\text{local}}, x_{\text{local}}, y_{\text{local}} \rangle$ ;
15. end if;
16. end if;
17. end foreach;
18. call 算法 1;
19. end if;
20. if 接收到  $q$  的查询结束通知 then
21.  $\text{notify\_flag}[q] = 0$ ;
22. end if.

#### 算法 5 查询节点择优查询处理

1. if 接收到来自中心存储节点的通知  $\text{notify}$  then
2. set  $\text{query\_dest} \leftarrow \text{notify. id}$ ;
3. set  $\text{query\_x} \leftarrow \text{notify. x}$ ;
4. set  $\text{query\_y} \leftarrow \text{notify. y}$ ;
5. end if;
6. when 查询结束

7. 向中心节点发送查询结束通知;

## 5 仿真实验

这里将利用 OPNET 14.5 仿真平台进行实验, 以证明本文方法的可行性和有效性。240×240m<sup>2</sup> 的区域中部署 144 个节点, 将网络划分成为 144 个 20×20m<sup>2</sup> 的网格, 设置每个传感器节点的传播距离为 30m。

为了节省能量, 与 EASE 一样, 利用了 B-MAC 协议作为 mac 协议, 查询节点是随机产生的任意节点, 它们按照一定的查询频率发送目标信息的查询请求。查询的可容忍误差均匀分布在  $[0, p_{\max}]$  区间, 查询率的默认值是 1/sec, 而最大可容忍误差  $p_{\max}$  的默认值为 50m。路由层采用 GPSR 路由协议, 并用一个能量计算模块来计算节点的能量消耗。仿真实验使用了随机路点模型 (Random Waypoint) 和半随机步行模型 (Semi-random Walk) 来作为目标的移动模型。其中, 随机路点模型是在仿真区域内选择一个目标路点, 以随机的速度向其运动, 到达之后, 停止一段时间, 选择新的路点继续运动; 而半随机步行模型类似于随机步行模型, 但是规定了移动的每一步速度的变化方向只能在 5% 以内随机地变化, 即  $\epsilon_v \in [-5\%, 5\%]$ , 而其运动方向只能在  $\pi/8$  范围内随机地变化, 即  $\epsilon_\theta \in [-\pi/8, \pi/8]$ 。

为了便于比较消息复杂度, 将消息复杂度进行了归一化处理。归一化的消息复杂度定义为 EASE 方法或 P-EASE 方法产生的消息量与同样条件下 GHT 方法<sup>[9]</sup>产生的消息复杂度的比值。

仿真实验中, 网络将运行 180s, 而前 15s 是网络的 warm-up 时间, 仿真结果仅考虑 15s 之后的情况。

参数	取值	参数	取值
区域大小	240×240m <sup>2</sup>	GPSR Beacon 帧间隔	5sec
簇头节点数量 (n)	144	GPSR Beacon 失效时间	15sec
探测节点密度 (f)	1/20×20m <sup>2</sup>	探测节点采样率 ( $\mu$ )	2/sec
感知半径	4m	查询节点查询率 ( $\lambda$ )	0.1~10/sec
发送消息的能量消耗	60mW	查询请求消息载荷	10bytes
接收消息的能量消耗	45mW	信息更新消息载荷	56bytes
空闲监听的能量消耗	15.5mW	查询结果消息载荷	56bytes
休眠状态的能量消耗	0.09mW	地理泛洪消息载荷	10bytes
B-MAC Preamble 帧长	271bytes	通知消息载荷	10bytes
B-MAC 唤醒时间间隔	100msec	信息获取开始时间	15sec
B-MAC 休眠时长	2.55msec	仿真时长	360sec

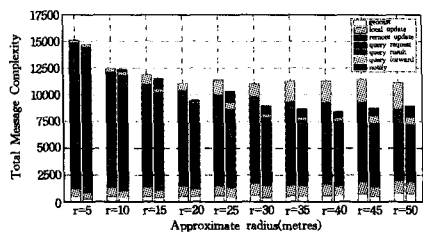
### 5.1 消息复杂度

本小节首先设定目标移动模型为半随机步行模型 (Semi-random Walk), 查询率为 1/sec, 最大容忍误差为 50m, 统计网络的消息量, 让近似半径从 0m 到 50m 进行变化, 统计网络中各类型的消息量; 然后通过归一化的方法, 确定查询率为 1/sec, 分别对 EASE 和 P-EASE 在 Semi-random Walk 和 Random Waypoint 模型下的消息复杂度随最大容忍误差的变化作了比较, 同时在确定最大容忍误差为 50m 时, 分别对 EASE 和 P-EASE 在 Semi-random Walk 和 Random Waypoint 模型下的消息复杂度随查询的变化作了比较; 然后, 观察在两种移动模型下, EASE 和 P-EASE 随时间变化的平均消息复杂度的变化; 最后, 给出了采用择优查询与未使用择优查询时消息复杂度的变化。

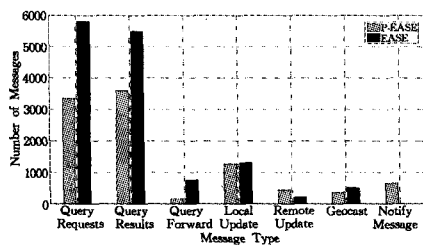
#### 5.1.1 消息量比较

首先, 取最大容忍误差为 50m, 查询率为 1/sec, 让近似半径从 0m 到 50m 进行变化, 结果如图 6(a) 所示, 可以发现,  $r$

越小,两种方法的消息量越接近,而当  $r$  变大时,差别变得明显。当  $r=0m$  时,EASE 和 P-EASE 的消息量相当,当  $r=50m$  时消息量约减少 31%,事实上当  $r>20m$  时,差距逐渐增大,而当  $r$  达到 40m 时,减小量逐渐稳定在 30%左右。因此,P-EASE 方法相比 EASE 方法能较大地减小消息量。



(a) 网络消息量随近似半径的变化



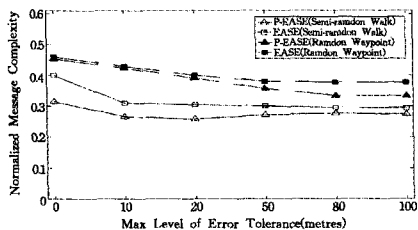
(b) 网络消息量中各消息类型所占比重

图 6 半随机模型下网络消息量仿真结果  
(最大容忍误差为 50m、查询率为 1/sec)

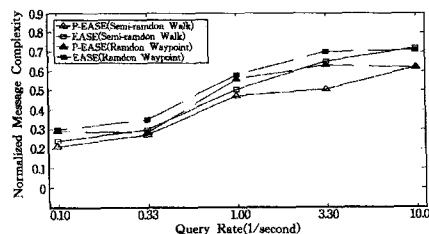
然后给出在半随机步行模型下最大容忍误差为 50m、根据理论计算取 P-EASE 估测区域半径为 42.81m、EASE 估测区域半径为 35.25m、查询率为 1/sec 时,EASE 和 P-EASE 的各种消息量的值。由图 6(b)的结果可以看到,此时查询请求(Query Request)消息量减少约 43%,查询返回结果(Query Result)的消息量约减少 35%,查询转发(Query Forward)消息量约减少 72%,本地更新(Local Update)消息相当,地理泛洪(Geocast)消息略有减少,远程更新(Remote Update)消息略有增加,并增加了一定的通知(Notify)消息,经过计算消息量约减少 31%。

### 5.1.2 消息复杂度比较

本小节主要比较 EASE 和 P-EASE 在 Semi-random Walk 和 Random Waypoint 模型下的消息复杂度随最大容忍误差  $p_{max}$  的变化以及随查询率  $\lambda$  的变化。



(a) 归一化的消息复杂度随最大容忍误差的变化( $\lambda=1/sec$ )



(b) 归一化的消息复杂度随查询率的变化( $p_{max}=50m$ )

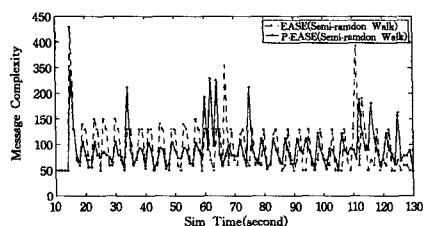
图 7 归一化的消息复杂度随查询精度的变化

当查询率为 1/sec 时,让最大容忍误差为从 0m 到 100m 变化,得到的实验结果如图 7(a)所示,可以发现,在 Random Waypoint 模型下,最大容忍误差  $<50m$  时,两种方法消息量相当;当最大容忍误差  $>50m$  时,P-EASE 消息量更少,约减少 7.5%~12.5%。在 Semi-random Walk 情况下,因为目标的运动相对规律,P-EASE 相对于 EASE 不会增加大量的更新消息,这时 P-EASE 减少的消息量约为 6.25%~25%。

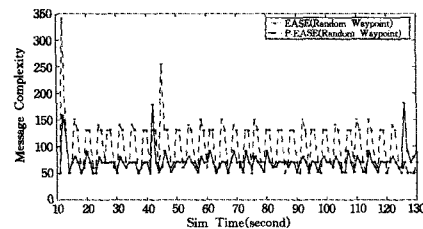
当最大容忍误差为 50m 时,让查询率从 0.1/sec 到 10/sec 按对数规律变化,得到的实验结果如图 7(b)所示,可以发现,在 Random Waypoint 模型下,当查询率  $<0.33/sec$  时,两种方法消息量相当;当最大容忍误差  $\geq 0.33/sec$  时,P-EASE 体现出了优势,消息量的减少约为 9%~28%。在 Semi-random Walk 情况下,因为目标的运动相对规律,P-EASE 相对于 EASE 不会增加大量的更新消息,这时 P-EASE 减少的消息量约为 10%~23%。

### 5.1.3 平均消息复杂度比较

本节对 EASE 和 P-EASE 在 Semi-random Walk 和 Random Waypoint 模型下的随时间变化的平均消息复杂度进行比较。设查询率为 1/sec 时,最大容忍误差为 50m,Semi-random Walk 模型如图 8(a)所示,曲线中的每一次查询或者更新可以看成是网络进行的一次查询或更新的消息复杂度,可以看到 P-EASE 的更新和查询的代价是小于 EASE 的。但是在 15s,30s,50s~70s,75s,105s,115s 以及 125s 时出现了多次 P-EASE 的附加消息量,这就是通知消息附加的消息量;同样地,在 Random Waypoint 模型中两者的比较也类似。可知在 Semi-random Walk 下,P-EASE 的消息复杂度大约减少了 32.3%,在 Random Waypoint 下,如图 8(b)所示,消息复杂度大约减少 58.2%,因此 P-EASE 比 EASE 的消息量有较大的减少,表现出更好的性能。



(a) 半随机步行模型, $\lambda=1/sec, p_{max}=50m$



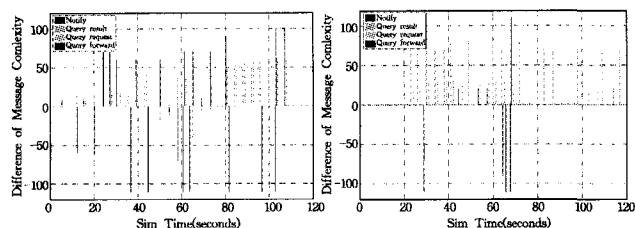
(b) 随机路点模型, $\lambda=1/sec, p_{max}=50m$

图 8 平均消息复杂度随时间变化

### 5.1.4 平均消息复杂度比较

P-EASE 方法相对于 EASE 方法较大地降低了查询的代价,这是因为使用择优查询之后降低了网络消息复杂度。本小节记录了 EASE 和 P-EASE 在 Semi-random Walk 和 Random Waypoint 模型下的消息差值,包括 4 种类型的差值:查询请求、查询转发、查询结果和通知消息,正的部分为 P-EASE 比 EASE 节省的消息量,负的部分为 P-EASE 相对于 EASE 增加的附加消息量。实验结果如图 9 所示,可见使用

择优查询机制,能大大减少 P-EASE 的网络消息量。

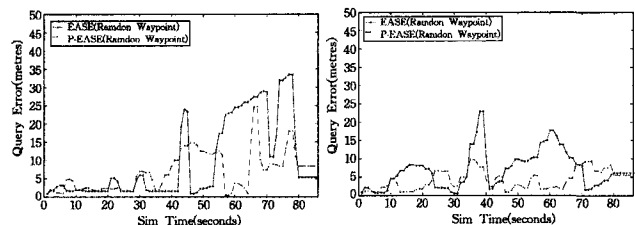


(a) 不同时刻 P-EASE 和 EASE 方法消息量之差(半随机步行模型) (b) 不同时刻 P-EASE 和 EASE 方法消息量之差(随机路点模型)

图 9 随机路点模型下 EASE 和 P-EASE 的消息量之差

## 5.2 近似查询精度

本小节比较了 EASE 和 P-EASE 方法在 Semi-random Walk 和 Random Waypoint 模型下查询结果和目标真实位置的误差值,选定查询率为 1/sec 时,最大容忍误差为 50m。图 10 的结果表明,无论在 Semi-random Walk 模型还是在 Random Waypoint 模型下,P-EASE 的查询精度都明显高于 EASE。由图 10(a)的结果可以得到在 Semi-random Walk 下的 P-EASE 平均查询精度比 EASE 约提高 28.9%,由图 10(b)的结果可以得到在 Random Waypoint 下的 P-EASE 平均查询精度比 EASE 约提高 39.9%。可以看出 P-EASE 的近似查询精度远远高于 EASE 方法。



(a) 不同时刻的查询误差(半随机步行模型) (b) 不同时刻的查询误差(随机路点模型)

图 10 近似查询精度比较

**结束语** 针对 EASE 方法近似查询误差问题,引入了预测的方法,提出了基于预测的近似查询的存储策略 P-EASE,分析了 EASE 存在的查询未考虑选择恰当的存储节点的问题,提出了基于地理位置的择优查询(Optimal Query)策略的解决方法。P-EASE 利用圆心角为 120 度的扇形代替圆形作为近似估测区域,利用线性趋势预测的方法能够将查询的平均误差大幅度降低。另一方面,择优查询算法能较大地降低由查询的目的节点选择不当造成的通信开销,并根据网络查询率、最大容忍误差等参数,进一步达到降低消息复杂度、节省能量的目的;同时也在一定程度上消除了中心节点查询负载较大的问题。大量的仿真实验的结果说明,P-EASE 方法的查询精度和能量效能都要明显高于 EASE 方法。

## 参考文献

[1] Akyildiz I F, Su W, Sankarasubramaniam Y, et al. Wireless sensor networks: A survey[J]. Computer Networks, 2002, 38(4): 393-422

[2] Lee E, Park S, Yu Fu-cai, et al. A Predictable Mobility-based Data Dissemination Protocol for Wireless Sensor Networks[C]// IEEE 22nd Int'l Conf. on Advanced Information Networking and Applications. 2008, 139: 741-747

[3] Li Jian-zhong, Li Jin-bao, Shi Sheng-fei. Concepts, issues and advance of sensor networks and data management of sensor networks [J]. Journal of Software, 2003, 14(10): 1717-1727

[4] Nath S, Gobbons P B, Seshan S, et al. Synopsis Diffusion for Robust Aggregation in Sensor Networks[C]// Proc. Second ACM Int'l Conf. Embedded Networked Sensor Systems (SenSys' 04). Nov. 2004

[5] Shrivastava N, Buragohain C, Agrawal D. Medians and Beyond: New Aggregation Techniques for Sensor Networks[C]// Proc. Second ACM Int'l Conf. Embedded Networked Sensor Systems (SenSys' 04). Nov. 2004

[6] Shenker S, Ratnasamy S, Karp B, et al. Data-centric storage in sensornets [J]. ACM SIGCOMM Computer Communications Review, 2003, 33(1): 137-142

[7] Ganesan D, Greenstein B, Estrin D, et al. Multi-resolution storage and search in sensor networks [J]. ACM Transactions on Storage, 2005, 1(3): 277-315

[8] Intanagonwiwat C, Govindan R, Estrin D, et al. Directed diffusion for wireless sensor networking [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2003, 11(1): 2-16

[9] Ratnasamy S, Karp B, Shenker S, et al. 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

[10] Demers A, Gehrke J, Rajaraman R, et al. The Cougar Project: A Work-in-Progress Report [J]. ACM SIGMOD Record, 2003, 32(4)

[11] Madden S R, Franklin M J, Hellerstein J M, et al. TinyDB: An Acquisitional Query Processing System for Sensor Networks, ACM Trans[J]. Database Systems, 2005, 30(1): 122-173

[12] Karp B, Kung H T. GPSR: greedy perimeter stateless routing for wireless networks[C]// Proceedings of ACM MOBICOM. Boston, Massachusetts, USA, 2000: 243-254

[13] Gil T M, Madden S. Scoop: an adaptive indexing scheme for stored data in sensor networks[C]// Proceedings of IEEE ICDE. Istanbul, Turkey, 2007: 89-102

[14] Li X, Kim Y J, Govindan R, et al. Multi-dimensional range queries in sensor networks[C]// Proceedings of ACM SenSys. Los Angeles, California, USA, 2003: 63-75

[15] Ganesan D, Estrin D, Heidemann J. DIMENSIONS: Why do we need a new data handling architecture for sensor networks? [J]. Computer Communication Review, 2003, 33(1): 143-148

[16] Greenstein B, Estrin D, Govindan R, et al. DIFS: a distributed index for features in sensor networks[C]// Proceedings of IEEE SNPA. Anchorage, Alaska, USA, 2003: 163-173

[17] Desnoyers P, Ganesan D, Shenoy P. TSAR: a two tier sensor storage architecture using interval skip graphs[C]// Proceedings of ACM SenSys. San Diego, California, USA, 2005: 39-50

[18] Braginsky D, Estrin D. Rumor routing algorithm for sensor networks[C]// Proceedings of WSNA. Atlanta, Georgia, USA, 2002: 22-31

[19] Liu X, Huang Q, Zhang Y. Combs, needles, haystacks: balancing push and pull for discovery in large scale sensor networks[C]// Proceedings of ACM SenSys. Baltimore, Maryland, USA, 2004: 122-133

[20] Sarkar R, Zhu X, Gao J. Double rulings for information brokerage in sensor networks[C]// Proceedings of ACM MOBICOM. Los Angeles, California, USA, 2006: 286-297

dings of Visualization, Imaging, and Image Processing 2003. 2003

- [5] Kostić A, Rančić D. Radar coverage analysis in virtual GIS environment[C]//Proceedings of International Conference on Telecommunication in Modern Satellite, Cable and Broadcasting Service 2003. Serbia and Montenegro, 2003; 721-724
- [6] 周桥, 徐青, 陈景伟, 等. 电磁环境建模与3维可视化[J]. 测绘科学技术学报, 2008, 25(2): 112-115
- [7] 陈鹏, 魏迎梅, 吴玲达, 等. 硬件加速的雷达作用范围三维可视化研究与实现[J]. 计算机工程与科学, 2008, 30(4): 33-36
- [8] 杨超, 徐江斌, 赵健, 等. 基于多层等值面的电磁环境三维可视化研究[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(11): 2767-2772
- [9] 杨超, 徐江斌, 吴玲达. 硬件加速的虚拟电磁环境体可视化[J]. 北京邮电大学学报, 2011, 34(1): 55-59
- [10] Longley A G, Rice P L. Prediction of Tropospheric Radio Transmission Loss Over Irregular Terrain, a computer method-1968 [R]. Boulder; Institute For Telecommunication Sciences Boulder Co, 1968
- [11] Hufford G. The ITS Irregular Terrain Model, version 1. 2. 2 — The Algorithm [R/OL]. Colorado: National Telecommunications and Information Administration Institute for Telecommunication Sciences, 2002 [2011-06-07]. [http://flattop.its.bldrdoc.gov/itm/itm\\_alg.pdf](http://flattop.its.bldrdoc.gov/itm/itm_alg.pdf)
- [12] Jarvis A, Reuter H I, Nelson A, et al. Hole-filled seamless SRTM data V4 [CP/OL]. International Center for Tropical Agriculture(CIAT), 2008. <http://srtm.csi.cgiar.org>
- [13] Zhang Wen-bo, Cao Yao-qin, Liu Zhi-guang. Research on Visualization of Electromagnetic Environment over Complex Terrain [C]//Proceedings of the 2012 International Conference on Computer Science and Electronic Engineering. Volume III, 2012; 595-598
- [14] Weinlich A, Keck B, Scherl H, et al. Comparison of High-Speed Ray Casting on GPU using CUDA and OpenGL [C]//Proceedings of the First International Workshop on New Frontiers in High-performance and Hardware-aware Computing (HipHaC'08). 2008; 25-30
- 
- (上接第 51 页)
- [21] Fang Q, Gao J, Guibas L J. Landmark-based information storage and retrieval in sensor networks[C]//Proceedings of IEEE INFOCOM. Barcelona, Catalunya, 2006; 1-12
- [22] Zhang W, Cao G, Porta T L. Data Dissemination with Ring-Based Index for Wireless Sensor Networks [C] // Proc. 11th IEEE Int'l Conf. Network Protocols(ICNP'03). Nov. 2003
- [23] Lu C, Xing G, Chipara O, et al. A Spatio-temporal Query Service for Mobile Users in Sensor Networks [C] // Proc. 25th Int'l Conf. Distributed Computing Systems(ICDCS'05). June 2005
- [24] Jiang H, Jin S. Scalable and Robust Aggregation Techniques for Extracting Statistical Information in Sensor Networks [C] // Proc. 26th Int'l Conf. Distributed Computing Systems(ICDCS'06). July 2006
- [25] Xu Jian-liang, Tang Xue-yan, Lee W-C. A New Storage Scheme for Approximate Location Queries in Object-Tracking Sensor Networks[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2008, 19(2): 262-275
- [26] Liu H, Jia X, Wan P, et al. Maximizing Lifetime of Sensor Surveillance Systems[J]. IEEE ACM Trans. Networking, 2007, 15(2): 334-345
- [27] Zhang W, Cao G. Optimizing Tree Reconfiguration for Mobile Target Tracking in Sensor Networks [C] // Proc. IEEE INFOCOM'04. Mar. 2004
- [28] Polastre J, Hill J, Culler D. Versatile Low Power Media Access for Wireless Sensor Networks [C] // Proc. ACM Second Int'l Conf. Mobile Systems, Applications, and Services (MobiSys'04). Nov. 2004
- [29] Wang Q X, Chen W P, Zheng R, et al. Acoustic Target Tracking Using TinyWireless Sensor Devices [C] // Proc. Second Int'l Workshop Information Processing in Sensor Networks (IPSN'03). Apr. 2003
- [30] Yang H, Sikdar B. A Protocol for Tracking Mobile Targets Using Sensor Networks [C] // Proc. IEEE Workshop Sensor Network Protocols and Applications. May 2003
- [31] Goel S, Imielinski T. Prediction-Based Monitoring in Sensor Networks; Taking Lessons from MPEG [J]. ACM Computer Comm. Rev., 2001, 31(5)
- [32] Xu Y, Winter J, Lee W-C. Dual Prediction-Based Reporting Mechanism for Object Tracking Sensor Networks [C] // Proc. First Ann. Int'l Conf. Mobile and Ubiquitous Systems (MobiQuitous'04). Aug. 2004
- [33] Kung H T, Vlah D. Efficient Location Tracking Using Sensor Networks [C] // Proc. IEEE Wireless Comm. and Networking Conf. (WCNC'03). Mar. 2003
- [34] Gui C, Mohapatra P. Power Conservation and Quality of Surveillance in Target Tracking Sensor Networks [C] // Proc. ACM MobiCom'04. Oct. 2004
- [35] Patten S, Poduri S, Krishnamachari B. Energy-Quality Tradeoffs for Target Tracking in Wireless Sensor Networks [C] // Proc. Second Int'l Workshop Information Processing in Sensor Networks (IPSN'03). Apr. 2003
- [36] Smith D, Singh S. Approaches to Multisensor Data Fusion in Target Tracking. A Survey [J]. IEEE Trans. Knowledge and Data Eng., 2006, 18(12): 1696-1710
- [37] Teng Jing, Snoussi H, Richard C. Prediction-based Proactive Cluster Target Tracking Protocol for Binary Sensor Networks [C] // IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology. 2007; 234-239
- [38] 李建中, 高宏. 无线传感器网络的研究进展 [J]. 计算机研究与发展, 2008, 45(1): 1-15
- [39] 陶汝谨, 龚正虎, 卢泽新. 两种新的 push-pull 平衡的大数据量无线传感器网络数据分发算法 [J]. 计算机研究与发展, 2008, 45(7): 1115-1125
- [40] 彭勇. 无线传感器网络中能量高效的目标跟踪协议研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2009