

# 查询驱动模式下两层传感器网络 Top-k 查询 汇聚算法研究

梁俊斌<sup>1</sup>, 马行坡<sup>2</sup>, 奎晓燕<sup>3</sup>

(1. 广西大学计算机与电子信息学院, 广西南宁 530004; 2. 信阳师范学院计算机与信息技术学院, 河南信阳 464000;  
3. 中南大学信息科学与工程学院, 湖南长沙 410083)

**摘 要:** 在两层传感器网络中, 查询驱动模式是将查询请求在下层传感器网络层进行分布式处理的一种查询处理模式. 在传感器节点产生数据的频率较高而用户发出查询请求的频率较低的情况下, 查询驱动模式能够大大减少数据传输量, 降低节点的能量消耗. 在这种模式下, 如何有效支持局部区域性 Top-k 查询是一个很有挑战性的问题. 针对这一问题, 本文首先构造了一种新的数据汇聚树(DAT), 接着在 DAT 的基础上提出了一种支持区域性 Top-k 查询的数据汇聚方案. 理论分析和仿真实验表明, 与已有算法相比, 本文提出的方案更加高效.

**关键词:** 查询驱动; 数据汇聚; Top-k; 两层无线传感器网络

**中图分类号:** TP301 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2014)10-2075-06

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2014.10.032

## Research on Data Aggregation Algorithms for Top-k Queries in Query-Driven-Based Two-Tiered Sensor Networks

LIANG Jun-bin<sup>1</sup>, MA Xing-po<sup>2</sup>, KUI Xiao-yan<sup>3</sup>

(1. School of Computer and Electronic Information, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China;

2. School of Computer and Information Technology, Xinyang Normal University, Xinyang, Henan 464000, China;

3. School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China)

**Abstract:** In two-tiered wireless sensor networks, a query-driven mode means that queries are processed in a distributed way at the sensor network level of the tiered architecture. When the data generating rates of the sensor nodes are high and the query frequencies are low, using query-driven mode can deeply shrink the amount of data flow and decrease the energy consumption of the sensor nodes. Under such mode, how to support region-based Top-k queries efficiently is a challenging problem. To solve this problem, firstly, a novel data aggregation tree named DAT is constructed. Then, a novel data aggregation scheme for region-based Top-k queries is proposed based on DAT. Theory analysis and simulation results show that, compared with existing schemes, our proposed scheme performs much better in efficiency.

**Key words:** query driven; data aggregation; Top-k; two-tiered sensor networks

## 1 引言

两层结构的传感器网络是由大量资源受限的处于低层的传感器节点和资源相对丰富的处于上层结构的主节点组成. 传感器节点的主要任务是监测环境并产生感知数据, 而主节点的主要任务是负责桥接传感器网络和外部网络用户. 由于两层传感器网络结构能够显著提高网络的生命周期和可扩展性<sup>[1]</sup>, 近年来越来越受到人们的重视<sup>[2~4]</sup>.

我们的目标是构建一种能有效支持区域性 Top-k 查询并能将处于两层传感器网络低层的子查询结果进行有效汇聚的机制. 在实现这一目标时有两个个关键问题. 第一, Top-k 查询是多变的. 查询区域的大小、位置以及参数 K 都是动态变化的. 因此, 在传感器网络中很难构建出最优化的路由来进行 Top-k 查询处理和网内数据汇聚; 第二, 传感器节点资源有限, 节点需要有效协作才能处理 Top-k 查询.

在本文中, 我们首先构建了一种新的数据汇聚树

(DAT)来优化区域性 Top-k 查询算法. DAT 的设计目标是,在传感器节点将自身产生的感知数据向根节点发送的过程中,尽可能早地对这些数据进行汇集,避免因传输大量无用数据而造成能量浪费.每个位于 DAT 树上的节点不仅知道它的父节点,还知道自己通过最短路径能到达主节点的下一跳节点.传感器节点的数据采用自下而上的方式沿着 DAT 树进行路由和汇聚,一旦确定在 DAT 树上不会再与查询区域内的其它节点产生的数据进行汇聚,该数据将沿着最短路径发送到主节点.为了得到最终的 Top-k 查询结果,主节点需要将不同路径的汇聚结果进行最后汇聚.接着,本文在 DAT 的基础上提出了一种 Top-k 查询处理机制 (TKQP),以有效支持区域性 Top-k 查询和网内数据汇聚.

## 2 相关工作

### 2.1 无线传感器网络数据收集算法

近年来在无线传感器网络提出了大量数据收集算法<sup>[5~16]</sup>.为了最大化网络生命周期,文献[13]基于最短路径树提出了一种高效的数据收集算法.文献[14]证明了构建最大化网络生命周期的最优化数据收集树是 NP 完全问题,并提出了一种近似算法来解决这个问题.文献[15]中,作者研究表明,不同的路由结构会影响传输过程中的数据包数量,同时,在任意两个最短路径树上进行路由的数据包并不会显著影响数据汇聚的有效性.文献[16]研究了如何在最小能量代价情况下构建数据收集树,作者证明了这是一个 NP 完全问题,并证明了最短路径树算法是一个 2-近似算法.

以上现有工作主要从全局角度出发对网络进行优化,目标是最大化网络生命周期或最小化能量开销.然而,对于局部区域性查询,还需要对局部优化问题进行考虑.

### 2.2 无线传感器网络中的 Top-k 查询机制

文献[17~19]把无线传感器网络中的 Top-k 查询分为精确 Top-k 查询和近似 Top-k 查询两种类型.精确 Top-k 查询要求查询结果中的数据项正好是所有候选数据中最大或者最小的前  $k$  个数据项,而近似 Top-k 查询并不需要精确的查询结果,采用查询结果的相对误差来衡量方案的优劣<sup>[18]</sup>.本文主要研究精确 Top-k 查询.

FILA<sup>[20]</sup>是一种典型的基于过滤器的 Top-k 查询处理方案,其基本思想是在每个传感器节点上安装一个过滤器来抑制不必要的传感器节点数据更新.为了确保 FILA 的正确性和有效性,过滤器的设置和更新之后查询的重新评估这两个基本问题应当重点关注和解决.DAFM<sup>[21]</sup>改进了 FILA 方案,在 DAFM 的每个周期中都计算了发送更新过滤器和使用旧的过滤器的效益.

只有当使用旧的过滤器的收益小于使用新过滤器的收益时,更新过滤器的收益才会被发送给传感器节点,发送的值会减去发送成本.文献[22]和文献[23]分别提出了不同的基于过滤器的 Top-k 查询机制.与 FILA 和 DAFM 不同的是,不同的传感器节点可能会采用不同的过滤器,而不是采用相同的过滤器.ECHT<sup>[23]</sup>是一种能有效处理连续性历史 Top-k 查询的新算法.在 ECHT 中,所有传感器节点的数据在第一个周期时无需经过过滤便可直接发送到基站,然后基站对 Top-k 查询结果进行探测并重新估算过滤器.必要时会对部分相关的传感器节点进行过滤器更新,文献[24]在无线传感器网络中首次研究了 Top-k 查询的时间间隔,算法从指定时间间隔内产生的感知数据中返回最高的感知值,并提出了一种基于过滤器的考虑时间间隔的 Top-k 查询评估算法.

与本文的查询驱动模式不同,以上 Top-k 查询处理机制主要是基于事件驱动的.另外,上述方法仍缺乏针对区域性 Top-k 查询的局部优化策略.

## 3 数据汇聚树 DAT

### 3.1 问题描述

给定一个 Top-k 查询  $Q_i = \langle C, t, K, QR \rangle$  (其中  $C$  表示单元号,  $t$  表示查询时隙,  $K$  是一个整数,  $QR$  表示被查询区域),我们的目标是得到相应的查询结果  $R_i$  并且最小化由查询  $Q_i$  引起的查询单元  $C$  内的节点通信代价.为了实现这个目标,一种好的方法是在  $QR$  中构建最优的数据汇聚树.由这棵树的树根产生的汇聚结果正好就是  $R_i$ .然而,在一个周期中可能会有多个查询,并且查询可能会是动态的.如果每个查询都构建一个最优数据汇聚树的话,将会消耗很多的时间和能量.因此我们在查询单元  $C$  中只构建一棵以  $M$  为根的树.

对于属于集合  $NS$  ( $NS$  表示被查询单元内的所有传感器节点的集合)的每个传感器节点  $S_i$ ,我们用 SBT ( $S_i$ )来表示以  $M$  为根节点的树上以  $S_i$  为根的子树,使用  $B(S_i)$ 来表示 SBT( $S_i$ )中的节点在一个周期内产生的数据集,使用  $A(S_i)$ 表示节点  $S_i$  上  $B(S_i)$ 的汇聚结果,那么,一棵最小代价汇聚树 MCAT 的定义如下:

**定义 1 最小代价汇聚树 (Minimum Cost Aggregation Tree, MCAT):** 给定一个连通图  $G = (V, E)$ ,其中  $V = NSUM$ ,  $E$  表示在两层传感器网络的单元  $C$  中连接任意两个相邻节点间边的集合,以及以下两条汇聚规则: (1)如果  $|B(S_i)| < K$ ,则  $A(S_i) = B(S_i)$ ; (2)如果  $|B(S_i)| \geq K$ ,  $A(S_i) = \{B(S_i)$  中最大的前  $K$  个数据项 $\}$ ,针对 Top-k 查询的 MCAT 是一棵以  $M$  为根的路由树,这棵树包含了所有  $C$  单元中的传感器节点,并且能够使得单元  $C$  中所有节点总的传输能耗和接收能耗最小化.

由于构建 MCAT 是属于 NP 完全的问题, 我们的问题就是如何在两层传感器网络中找到近似最优 MCAT 的数据汇聚树 DAT.

### 3.2 DAT 构建算法

算法 1 是构建 DAT 的伪代码. 直观来看, 在一个指定区域内的 Top-k 查询中, DAT 的子查询结果将会快速与另一个子查询结果相遇并进行汇聚. 最大独立集构建好以后, 每个节点都会知道到达  $M$  的最短路径上的下一跳节点, 这一点对于下一节要提出的 Top-k 查询处理机制非常重要.

#### 算法 1 Pseudocode for constructing a DAT

Input:  $G = \{E, V\}$ , where  $V = NS \cup \{M\}$ ,  $E = \{(S_i, S_j) \mid S_i, S_j \in V, \text{ and } S_i \text{ and } S_j \text{ are two neighbor nodes}\}$

Output: a data aggregation tree DAT

1. construct a shortest path tree and a MIS on  $G$ ;
2. for each node  $S_i \in \{V - MIS\}$
3.  $S_i$  takes the role of a leaf node;
4.  $Hop = 0$ ;
5. for each node  $S_j \in MIS$ 
  - //  $S_j$ . hop denotes the hop counts from  $S_j$  to  $M$  along the shortest path
  - 6. if  $((S_i \text{ and } S_j \text{ are neighbors}) \&\& (S_j. \text{hop} < Hop))$
  - 7.  $Hop = S_j. \text{hop}$ ;
  - 8.  $S_i$  takes  $S_j$  as its parent;
  - 9. end if
  - 10. end for
  - 11. end for
  - 12. for each sensor node  $S_l \in MIS$ 
    - //  $Next_{S_l}$  is the next hop of  $S_l$  on the shortest path to  $M$
    - 13.  $S_l$  takes  $Next_{S_l}$  as its parent;
    - 14.  $S_l$  sends a searching message to  $Next_{S_l}$ ;
    - 15. end for
    - 16. if a node  $S_h$  receives a searching message
    - 17. if  $S_h$  is a connector
    - 18.  $S_h$  deletes the message;
    - 19. else if  $(S_h \text{ is a leaf node}) \&\& ((\text{the parent of } S_h). \text{hop} < (\text{the message originator}). \text{hop})$
    - 20.  $S_h$  changes its role to be a connector;
    - 21.  $S_h$  deletes the message;
    - 22. else
    - 23.  $S_h$  takes  $Next_{S_h}$  as its parent;
    - 24.  $S_h$  changes its role to be a connector;
    - 25.  $S_h$  sends the searching message to  $Next_{S_h}$ ;
    - 26. end if
    - 27. end if

## 4 Top-k 查询处理机制

以 DAT 为基础, 我们提出了一种有效的网内 Top-k

查询处理机制 TKQP, 其工作原理如下:

在两层传感器网络中, 一个 Top-k 查询  $Q_i = \langle C, t, K, QR \rangle$  首先会用自顶向下的方式采用剪枝算法在 DAT 路径上进行传输, 直到所有  $QR$  中的节点接收到这个查询为止.  $QR$  中节点产生的数据将会采用自底向上的方式沿着 DAT 中的路径传上去, 数据将在部分 DAT 中的节点处进行汇聚. 如果一个节点发现在 DAT 树上其到达主节点的路径上不再有数据需要与当前汇聚结果进行汇聚, 该节点会通过最短路径把当前汇聚结果直接发送到  $M$ . 在构建 DAT 的过程中, 每个传感器节点会找到其到达主节点的最短路径上的下一跳节点并记录下来. 由于篇幅原因, 在此我们不再详细介绍 TKQP 的细节, 我们只列出处理 Top-k 查询存在的一些关键问题并给出相应的解决方法.

(1) 第一个关键问题是如何通过剪枝算法沿着 DAT 中的路径有效地将  $Q_i$  传输到  $QR$  中的每个节点. 为了解决这个问题, 我们使得每个节点  $S_i$  能够记录一个矩形, 该矩形需要满足下面两个条件:

(1) 其中一条边必须与水平线平行.

(2) 矩形必须能覆盖所有  $S_i$  的子孙节点且矩形尽量要小.

我们用  $ST-REC(S_i) = \langle x_l, x_u, y_l, y_u \rangle$  来表示节点  $S_i$  保存的矩形, 其中  $x_l$  和  $x_u$  表示矩形中的节点横坐标的下界和上界,  $y_l$  和  $y_u$  则表示矩形中的节点纵坐标的下界和上界. 每个节点  $S_i (0 < i \leq N)$  得出  $ST-REC(S_i)$  值的方法如下:

初始时, 设置  $ST-REC(S_i) = \langle x_i, x_i, y_i, y_i \rangle$ , 其中  $x_i$  和  $y_i$  是节点  $S_i$  的坐标. 如果  $S_i$  是个叶子节点, 它会发送一个包含  $ST-REC(S_i)$  信息的消息给 DAT 中的父亲节点. 当节点  $S_j$  接收到一个包含  $ST-REC(S_i)$  信息的消息时, 它首先会检查是否  $ST-REC(S_j)$  能覆盖  $ST-REC(S_i)$ . 如果  $ST-REC(S_j)$  能覆盖  $ST-REC(S_i)$  的话,  $S_j$  将会丢弃这个消息; 否则的话,  $S_j$  将扩充  $ST-REC(S_j)$ , 使其能够覆盖  $ST-REC(S_i)$ , 并发送这个包含  $ST-REC(S_j)$  信息的消息给其在 DAT 中的父节点.  $S_j$  的父节点收到  $ST-REC(S_j)$  信息后会与节点  $S_j$  做同样的操作. 这个处理过程会不断执行, 直到没有传感器节点会再接收到任何包含矩形信息的消息为止.

这个方法能使 DAT 中的每个节点不仅知道自己的矩形信息, 同时还知道其孩子节点的矩形信息. 这使得每个 DAT 中的节点能够获知其应当把查询请求发送给哪个或者哪些孩子. 举例来说, 假如节点  $S_i$  收到一个查询请求  $Q_i$ , 而  $S_h$  是节点  $S_i$  的一个孩子节点, 只有当  $ST-REC(S_h) \cap QR \neq \emptyset$  时, 节点  $S_i$  才会将  $Q_i$  发送给  $S_h$ . 存在一种情况, 就是尽管  $ST-REC(S_h) \cap QR \neq \emptyset$ , 但是

SBT( $S_i$ )的节点中没有一个节点在  $QR$  中,但是这不影响查询结果且对整体能耗影响很小. 如果一个节点发现其不在  $QR$  中且其孩子的矩形信息不会与  $QR$  相交,该节点就会发送一个消息给其父亲节点,这个消息用来通知其父亲节点不用继续等待其发送数据. 一个 Top-k 查询过程如图 1 所示.

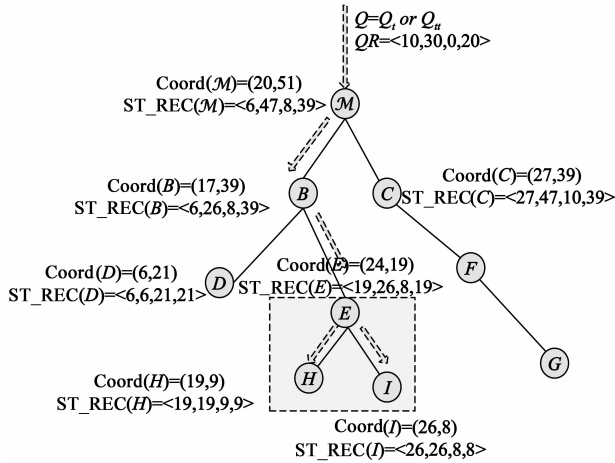


图1 Top-k查询 $Q_i$ 的一个传播过程示例(带虚线的箭头表示 $Q_i$ 的传播路径)

(2)第二个关键问题是,给定一个查询  $Q_i$ , 节点  $S_i$  怎样获知在 DAT 中从节点  $S_i$  到  $M$  的路径上已经没有任何数据需要与当前的汇聚结果进行汇聚? 为了解决这个问题,我们定义了下述两种类型的节点. 其中,  $\text{Branch}(Q_i, S_i)$  表示节点  $S_i$  的孩子节点的矩形信息与  $QR$  相交的数量.

**$D\_node$ :** 如果  $\text{Branch}(Q_i, S_i) > 1$  且在 DAT 中从  $S_i$  到  $M$  的路径上没有其它节点  $S_j$  满足  $\text{Branch}(Q_i, S_j) > 1$ , 则  $S_i$  就是  $Q_i$  中的一个  $D\_node$  节点.

**$G\_node$ :** 如果  $S_i$  在  $QR$  内, 并且从  $S_i$  到达  $M$  的路径上不存在位于  $QR$  中的其它节点  $S_j$ , 则  $S_i$  就是  $Q_i$  中的一个  $G\_node$ .

以上两种类型的节点都是针对具体的  $Q_i$  而定义的,  $Q_i$  不同, 节点的类型也可能不同. 为了便于说明, 我们在下文中描述  $D\_node$  和  $G\_node$  节点时省略了  $Q_i$ . 算法 2 描述了节点如何确定自身是  $D\_node$ ,  $G\_node$  还是一个普通节点.

算法 2 Pseudocode for a node  $S_i$  to determine its role

//Suppose  $S_i$  has received a query message  $QMSG$  which contains  $Q_i$ , and  $\text{Branch}(Q_i, S_i)$  has been worked out

1. if !  $QMSG.find\_D\_node$  &&  $\text{Branch}(Q_i, S_i) > 1$
2.  $S_i$  is a  $D\_node$  for  $Q_i$ ;
3.  $QMSG.find\_D\_node = true$ ;
4. end if

5. if !  $QMSG.find\_G\_node$  && ( $S_i$  is in  $QR$ )
6.  $S_i$  is a  $G\_node$  for  $Q_i$ ;
7.  $QMSG.find\_G\_node = true$ ;
8. end if
9. send  $QMSG$  down along the paths in DAT if it is necessary;
10. return;

## 5 性能分析

本节我们将通过和已有方案相比较来评估本文提出的方案的有效性. 选择 OMNET++ 作为仿真工具. 在仿真模型中, 假设一个单元是一个  $400\text{m} \times 400\text{m}$  的矩形区域, 其中部署了 500 个传感器节点, 节点的通讯半径设置为 50m, 被查询区域的默认大小为  $100\text{m}^2$ , 发送 1bit 数据消耗的能量是 1 能量单位, 接收 1bit 数据消耗的能量是 0.5 个能量单位. 和文献[1]一样, 我们仍假设数据包的传输是无碰撞和无差错的.

本文用  $C_d$  来表示在查询区域中每个周期内响应一个 Top-k 查询传感器节点产生的数据项发送到主节点时耗费的传输代价(以比特为单位来衡量), 并使用这个参数来评估 Top-k 查询处理方法的性能.

本节通过在三种机制中进行比较来分析  $C_d$  的性能. 第一种机制是在数据不能汇聚的情况下通过最短路径把数据项传输到主节点. 第二种机制是用 DST<sup>[22]</sup> 作为数据收集树, 并采用 TAG<sup>[5]</sup> 中的方法来汇聚数据项. 第三种机制是采用本文提出的方法, 即使用 DAT 作为数据汇聚树, 使用 TKQP 作为 Top-k 查询处理方法. 其中, 除了参数  $K$  之外的所有参数均采用默认值.

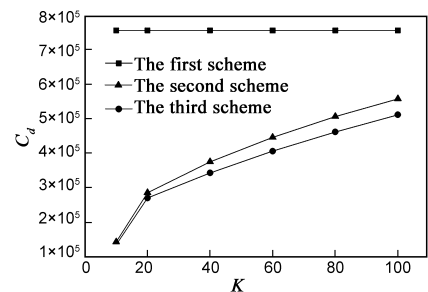


图2  $C_d$ 的仿真结果

图2是  $C_d$  的仿真结果. 仿真实验表明, 在第一种机制中, 当  $K$  增加时,  $C_d$  的值基本没有发生改变. 这是因为第一种机制是基于事件驱动的, 无论  $K$  值多大, 所有传感器节点的测量值都会发送到主节点. 由图2可知, 当采用数据汇聚机制时,  $C_d$  的值会降得非常快, 当  $K$  比较小时这一现象更加明显. 而在第三种机制中,  $C_d$  的变化趋势与第二种机制基本相同, 只是  $C_d$  的值比在第二种机制中要小一些. 仿真实验表明, 在指定的 Top-k 查询区域中, 我们提出的第三种机制能够比第二种机

制获得更好的数据汇聚性能. 从图 2 还可以发现, 当  $K$  变大时, 第二种机制和第三种机制的  $C_d$  值差距越来越大. 这说明在  $K$  值较大时, 我们提出的机制能够获得比第二种机制更好的性能.

## 6 结论

本文研究了两层传感器网络中基于查询驱动的 Top-k 查询数据汇聚机制, 提出了一种新的算法来构建数据汇聚树 DAT. 基于 DAT 树, 本文提出了一种称为 TKQP 的 Top-k 查询处理方法. 仿真结果表明, 本文设计构造的数据汇聚树 DAT 以及基于 DAT 树的 Top-k 查询处理方法 TKQP 能够有效支持限定查询区域的区域性 Top-k 查询, 并能够获得比已有方法更加高效的查询效率.

### 参考文献

[1] R Zhang, J Shi, Y Z Liu, et al. Verifiable fine-grained Top-k queries in tiered sensor network[A]. Proc of IEEE INFOCOM [C]. San Diego CA: IEEE, 2010. 1 – 9.

[2] W F Liang, B C Chen, J X Yu. Top-k query evaluation in sensor networks under query response time constraint[J]. Information Sciences, 2011, 181(4): 869 – 882.

[3] Q H Pan, M L Li, M Y Wu, W Shu. Optimization of accurate Top-k query in sensor networks with cached data[A]. Proc of IEEE WCNC[C]. Kowloon: IEEE, 2007. 4233 – 4238.

[4] F Chen, A Liu. Safe Q: Secure and efficient query processing in sensor networks[A]. Proc of IEEE INFOCOM[C]. San Diego CA: IEEE, 2010. 2642 – 2650.

[5] S Madden, M Franklin, J Hellerstein, W Hong. The design of an acquisitional query processor for sensor networks[A]. Proc of SIGMOD[C]. New York: ACM, 2003. 491 – 502.

[6] Z Ye, AA Abouzeid, J Ai. Optimal policies for distributed data aggregation in wireless sensor networks[A]. Proc of IEEE INFOCOM[C]. Anchorage, AK: IEEE, 2007. 1676 – 1684.

[7] J Gao, L Guibas, N Milosavljevic, J Hershberger. Sparse data aggregation in sensor networks[A]. Proc of IPSN[C]. New York: ACM, 2007. 430 – 439.

[8] W S Jung, K W Lim, Y B Ko, S J Park. A hybrid approach for clustering-based data aggregation in wireless sensor networks [A]. Proc of ICDS[C]. Cancun: IEEE, 2009. 112 – 117.

[9] R J Barton, R Zheng. Order-optimal data aggregation in wireless sensor networks using cooperative time-reversal communication[A]. Proc of CISS[C]. Princeton, NJ: IEEE, 2006. 1050 – 1055.

[10] 梁俊斌, 王建新, 陈建二. 在传感器网络中构造延迟限定的最大化生命周期树[J]. 电子学报, 2010, 38(2): 345 – 351.

Liang Jun-bin, Wang Jian-xin, Chen Jian-er. On the construc-

tion of a delay-constrained maximum lifetime tree in wireless sensor networks[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(2): 345 – 351. (in Chinese)

- [11] 奎晓燕, 杜华坤, 梁俊斌. 无线传感器网络中一种能量均衡的基于连通支配集的数据收集算法[J]. 电子学报, 2013, 41(8): 1521 – 1528.
- Kui Xiao-yan, Du Hua-kun, Liang Jun-bin. An energy-balanced connected dominating sets for data gathering in wireless sensor networks [J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(8): 1521 – 1528. (in Chinese)
- [12] L Shan, Jk Wang, W Wei. An energy-efficient data aggregation routing algorithm in wireless sensor networks[J]. Information Technology Journal, 2012, 11(10): 1463 – 1469.
- [13] D J Luo, X J Zhu, X B Wu, G H Chen. Maximizing lifetime for the shortest path aggregation tree in wireless sensor networks[A]. Proc of IEEE INFOCOM[C]. Shanghai: IEEE, 2011. 1566 – 1574.
- [14] Y Wu, S Fahmy, N B Shroff. On the construction of a maximum lifetime data gathering tree in sensor networks; NP-completeness and approximation algorithm[A]. Proc of IEEE INFOCOM[C]. Phoenix, AZ: IEEE, 2008. 1 – 9.
- [15] C L Liu, G H Cao. Distributed monitoring and aggregation in wireless sensor networks[A]. Proc of IEEE INFOCOM[C]. San Diego CA: IEEE, 2010. 1 – 9.
- [16] T Kuo, M Tsai. On the construction of data aggregation tree with minimum energy cost in wireless sensor networks; NP-completeness and approximation [A]. Proc of IEEE INFOCOM[C]. Orlando, FL: IEEE, 2012. 2591 – 2595.
- [17] M J Wu, J L Xu, X Y Tang. Processing precision-constrained approximate queries in wireless sensor networks[A]. Proc of MDM[C]. Nara, Japan: IEEE Computer Society, 2006. 31.
- [18] 毕冉, 李建中, 程思瑶. 无线传感器网络  $(\epsilon, \delta)$ -近似 Top-k 查询处理算法[J]. 通信学报, 2011, 32(8): 45 – 54.
- Bi Ran, Li Jian-zhong, Cheng Si-yao.  $(\epsilon, \delta)$ -approximate Top-k query processing algorithm in wireless sensor networks[J]. Journal on Communications, 2011, 32(8): 45 – 54. (in Chinese)
- [19] M J Wu, J L Xu, X Y Tang, W C Lee. Top-k monitoring in wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2007, 19(7): 962 – 976.
- [20] H T Mai, Y W Lee, K Y Lee, et al. Distributed adaptive Top-k monitoring in wireless sensor networks[J]. Journal of Systems and Software, 2011, 84(2): 314 – 327.
- [21] S J Tang, X F Mao, X Y Li. Efficient and fast distributed Top-k query protocol in wireless sensor networks[A]. Proc of ICNP[C]. Vancouver, BC: IEEE, 2011. 99 – 108.
- [22] B Malhotra, M A Nascimento, I Nikolaidis. Exact Top-k queries in wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2011, 23(10): 1513 –

1525.

- [23] J Cheng, H B Jiang, J C Liu, W Y Liu, C G Wang. On efficient processing of continuous historical Top-k queries in sensor networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular technology, 2011, 60(5): 2363 – 2367.
- [24] B C Chen, W F Liang, J X Yu. Online time interval Top-k queries in wireless sensor networks[A]. Proc of MDM[C]. Kansas City, MO, USA: IEEE, 2010. 177 – 182.

### 作者简介



**梁俊斌** 男, 1979 年生于广西南宁, 2010 年获得中南大学计算机应用技术专业博士学位. 目前为广西大学计算机与电子信息学院副教授, 研究方向为无线传感器网络.  
E-mail: liangjb2002@163.com



**马行坡** 男, 1980 年生于河南郑州. 2013 年获得中南大学计算机应用技术专业博士学位. 目前为信阳师范学院计算机与信息技术学院讲师, 研究方向为无线传感器网络、智能信息系统.  
E-mail: maxingpo@csu.edu.cn



**奎晓燕(通讯作者)** 女, 1980 年生于云南玉溪. 工学博士, 讲师. 主要研究方向为无线传感器网络, 移动自组织网络.  
E-mail: xykui@csu.edu.cn