无线传感器网络中事件驱动数据收集研究进展*

梁俊斌[1,2]，邓雨荣[1]，郭丽娟[1]，李陶深[2]

（1. 广西电网电力科学研究院，南宁 530023；2. 广西大学 计算机与电子信息学院，南宁 530004）

摘　要：无线传感器网络是目前研究的热点，事件驱动数据收集是无线传感器网络中一种重要的信息采集方式。由于节点普遍具有能量水平低、通信能力弱、易损坏等特点，而用户普遍需要网络能长时间稳定工作或尽快获得数据，因此，如何以低能耗、低延迟、高可靠的方式完成事件驱动数据收集是研究的难点。介绍了事件驱动数据收集的概念和特点，对已有的典型事件驱动数据收集协议进行了系统的分析和对比。通过探讨存在的挑战和亟待解决的关键性问题，为下一步更深入的研究指明了方向。

关键词：无线传感器网络；事件驱动；数据收集

中图分类号：TP393　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1001-3695(2012)10-3601-05

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.10.001

Research progresses of event-driven data gathering in WSN

LIANG Jun-bin[1,2], DENG Yu-rong[1], GUO Li-juan[1], LI Tao-shen[2]

(1. *Guangxi Power Grid Electric Power Research Institute*, *Nanning* 530023, *China*; 2. *School of Computer & Electronics Information*, *Guangxi University*, *Nanning* 530004, *China*)

Abstract: Wireless sensor network is a hot spot in current research, and event-driven data gathering is an important way of information collection for wireless sensor network. The nodes in the network just have limited energy and their communication abilities are weak. Moreover, the nodes are easy to be broken. However, users often need the network can provide long time or low delay services. Therefore, how to gather all data in the network with a way of low energy consumption, low delay and high reliability, is a difficult problem. This paper introduced the concepts and features of the event-driven data gathering, and gave systematic analysis and comparison on existing typical protocols. By discussing challenges and key problems in event-driven data gathering, the next research orientation will be found.

Key words: wireless sensor networks(WSN); event-driven; data gathering

0　引言

无线传感器网络(WSN)是近年来受到国内外广泛关注的研究热点。无线传感器网络一般部署在条件恶劣或者人类很难进入的环境中，如原始森林、沙漠、战场、野外的输电线路[1]等。在一个无线传感器网络中，分布着数量庞大的节点，这些节点往往被用户用飞机或汽车运输，然后以随机的方式放入指定区域执行复杂的任务。由于所有节点均具有有限的存储空间和计算能力，同时通信范围也有限，为了高效地完成任务，它们必须快速、自治地相互配合，以协作的方式进行工作。

无线传感器网络在工作过程中，节点会不断地感知到周边环境的数据。节点感知到数据后，通过无线天线将数据以多跳的方式发送给远方的 sink 节点(或称为基站)进行处理。其中，采用多跳方式是由于节点的通信能力有限，当一个节点需要传送数据给远方某个目标节点时，必须借助于源节点与目标之间的其他节点对数据进行中转。而 sink 节点是一类特殊的节点，一般认为其与无限的电源连接，且具有强大的计算能力和充足的存储空间。Sink 节点是无线传感器网络与外部世界(Internet 或用户)的接口。采集网络中用户需要的数据，就被称为数据收集。数据收集是无线传感器网络中最重要的操作之一，能否有效地采集到合适的数据，直接关系到应用的效果。

根据网络工作的模式，可以将目前存在的无线传感器网络数据收集协议分为两大类：周期性数据收集和事件驱动数据收集。周期性数据收集是指传感器网络对监测区域进行周期性监测，节点定期生成数据返回给用户；而事件驱动数据收集是指网络中的节点在通常状态下不进行数据收集，仅当网络中发生一定的事件时，节点才针对事件进行数据收集。对于周期性数据收集，目前有很多文献对其进行研究(如文献[2]等)，而针对事件驱动数据收集的文献较少。因此，本文主要关注后者。

对于事件驱动数据收集，根据事件发生的地点在网络区域的外部还是内部，又可以进一步划分为外部事件驱动数据收集和内部事件驱动数据收集，如图 1 所示。外部数据收集又称查

收稿日期：2012-03-13；**修回日期**：2012-04-15　**基金项目**：国家自然科学基金资助项目(61103245,60963022,61063045)；国家“863”计划资助项目(2011AA05A115)；广西自然科学基金资助项目(2012GXNSFBA053163)

作者简介：梁俊斌(1979-)，男，广西南宁人，副教授，博士，主要研究方向为无线传感器网络、物联网技术(liangjb2002@163.com)；邓雨荣(1964-)，男，广西南宁人，教授级高级工程师，主要研究方向为电气设备在线监测、传感器技术；郭丽娟(1973-)，女，广西南宁人，高级工程师，主要研究方向为电气设备在线监测、传感器技术；李陶深(1957-)，男，广西南宁人，教授，博士，主要研究方向为网络优化算法.

询式数据收集,是指在网络外的用户发出查询命令后,相关传感器节点再进行监测并生成所需要的数据返回给用户;而内部事件驱动数据收集是指节点对监测区域进行持续性监测,节点感知到突发事件发生的信息后,迅速将相关数据返回给用户进行报告。

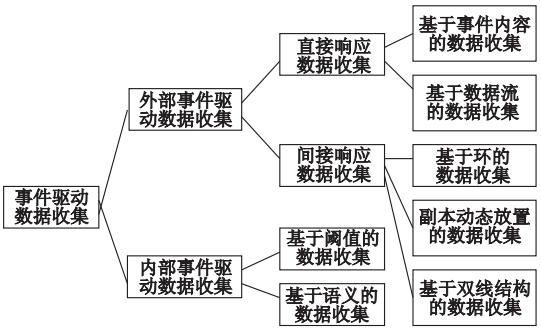

图1 事件驱动数据收集的分类

下面对图 1 所示的不同事件驱动数据收集协议进行分析,对比其的优缺点,分析未来研究的方向。

1 外部事件驱动数据收集

在外部事件驱动数据收集中,当事件发生时(即用户提出查询请求),符合查询条件的节点会提供自己的数据。外部事件驱动数据收集一般包括两个过程:查询的发布和数据的响应。如何在获得满足要求的数据的前提下,有效地减少这两个过程的能量消耗,是研究的重点。按网络响应查询的方式,可以将外部事件驱动数据收集分为直接响应数据收集和间接响应数据收集。

1.1 直接响应数据收集

在直接响应数据收集中,当有查询到来时,节点将满足查询条件的数据直接传送到 sink 节点。根据响应的类型,直接响应数据收集的典型工作又可以分为基于事件内容的协议和基于数据流的协议。

1.1.1 基于事件内容的数据收集协议

对于基于事件内容的协议,主要是针对监测的事件内容(而不是单纯的感知数据)进行存储和响应。文献[3]观察到用户主要对网络监测到的时间—空间相关事件的结果感兴趣,而对数量庞大的感知数据并不感兴趣,因此提出一种能量有效的以数据为中心进行存储的时—空查询处理算法。首先利用散列函数把事件类型(不是感知数据)映射到网络中某个地理位置,然后由距离该位置最近的节点充当事件的存储节点。当查询需要某个事件的信息,将向存储节点索取。

文献[4]研究了长期的环境监测应用,考虑到用户不仅需要网络周期性地提供监测区域的大致情况结果,而且可能需要对某些异常事件作详细查询。为了减少网络中总的能量耗费,提出一个多分辨率的压缩和查询框架(multi-resolution compression and query framework)来支持网内数据的时—空压缩和存储(spatial and temporal compression and storage)。在这个框架中,低分辨率的数据(如监测区域的粗略数据和旧的数据)将直接传输到 sink 节点;而高分辨率的数据(如监测区域的详细数据和新的数据)则需要通过查询获取。

文献[5]研究如何通过降低响应查询数据的精度来减少节点的传输数据量,使得节点能量得到保存。在实际应用中,用户往往并不关心查询的具体数据,而只关心查询的结果,因此提出一种错误容忍的基于实体(entity-based)的查询响应机制,使得节点只传送符合查询精度要求范围的查询结果。

文献[6]研究网络中的空间查询(spatial queries),即查询某个地点附近的监测数据。K-近邻查询(K-nearest neighbor, K-NN)是比较典型的空间查询,它的实现一般依靠基于路线的处理技术(itinerary-based processing techniques)。但是,满足查询中延迟限制和能量有效性等要求的路线并不容易获得。因此提出一种并行的同心圆形式的路线处理技术(parallel concentric-circle Itinerary-based query processing technique)来解决。

1.1.2 基于数据流的数据收集协议

对于基于数据流的协议,是将各个节点产生的感知数据直接传输到查询注入点以响应查询。这些数据组成多个传向 sink 节点的数据流,而传输大量的数据流会使节点消耗较多的能量。

文献[7]针对需要连续查询的环境监测应用,提出一种能有效减少数据流的方法。该方法根据节点的位置将其划分为若干个簇,然后使用高斯核估计(Gaussian kernel estimation)来处理网络中的查询,最后得到一组数量很小的 Hermite 因子(Hermite coefficient)来近似查询的结果。通过这种方式,既可以保证提供可靠的查询结果,又能减少节点的消息复杂度为 $O(\log n)$,其中 n 是网络中节点的数量。

文献[8]提出一种利用近似查询来减少节点通信代价的方案:首先,sink 节点根据响应查询的历史信息,采用高斯概率分布预测出一个粗略的查询响应结果;然后根据这个结果决定从哪些节点采集相应的数据,并为此建立一个从这些节点通向 sink 节点的树结构。

文献[9]针对移动目标跟踪的应用,研究如何查询目标的移动轨迹。它的主要思想是利用目标轨迹的空间相关性来进行信息的概率分发。节点会在目标接近它们时被唤醒,然后记录目标的信息,然后以一定概率与目标移动的上游和下游节点进行信息交换。这样,轨迹的信息将被其所经过的节点保存。当查询注入网络时,只要找到一个节点响应,就能获得满足条件的数据。

文献[10,11]针对查询搜索的要求,研究使用蚁群算法来优化能量有效性。查询节点会连续发送多只蚂蚁来寻找自己到保存事件信息最近的副本的较优路径,使得查询过程中复制和搜索的总能耗得以减少,同时有效缩短查询的延迟。

1.2 间接响应数据收集

为了进一步减少查询的延迟和数据传输量,目前有一部分工作研究如何在网络中保存数据的副本,使得查询不需要覆盖整个网络,而只需要从最近的副本处获得结果,笔者称这样的数据收集为间接响应数据收集。根据副本放置的方式,目前典型的工作可以分为基于环(ring-based)的协议、副本动态放置的协议和基于双线结构(double-ruling-based)的协议三类。

1.2.1　基于环的数据收集协议

对于基于环的协议,存放数据副本的节点(简称存储节点)组成一个或若干个环状结构,需要查询数据时,向环的方向发送查询请求以快速获得结果。

文献[12]研究如何解决传统以数据为中心的存储中,由于事件和查询分布不均衡所导致的能量消耗不均衡和负载不均衡问题。其首先提出一个近似算法,根据事件和查询分布的变化来求解合适的数据副本放置点,然后采用基于环的结构,根据查询负载的大小把数据副本分发给放置点周围的节点,以进行保存和响应。

文献[13]注意到传统的以数据为中心的存储方法中,sink 节点和存储节点周围存在热区,即这些节点周边的节点需要不断中继查询请求和响应数据,造成能量消耗过快,因此提出采用放置多个 sink 节点和基于环的负载均衡数据存储协议来解决;同时,各个环在不同时间段轮换工作,以进一步消除热区。

文献[14]提出了一种基于环结构的多分辨率数据存储机制,以满足不同用户对数据精度的需求。它首先采用索引树的存储机制来构建层次式的存储结构;然后利用环和索引树的结构特性,设计新的基于环结构的事件存储和查询路由方案;最后根据每个环的访问频率,对环的相关参数(如环的半径、环的间隔距离等)进行优化。

1.2.2　副本动态放置的数据收集协议

对于副本动态放置的协议,数据副本将根据查询频率的变化,动态地改变自己的位置,使得副本总是靠近查询频率较高的地方。

文献[15]为了减少响应查询数据流的数量,研究在网络中放置查询算子(汇聚、过滤和连接等)。此外,不同的查询可能具有不同的频率。在网络中合理地放置副本,以满足不同频率查询的需要,能有效地提供满足要求的响应数据:首先将每个查询在网络中映射为一个查询图,然后根据查询图结合最小化节点能量耗费、存储代价和计算代价的要求,选择合适的节点来放置算子或存放数据副本。

文献[16]针对查询频率可变且可能会不断改变位置的应用,提出动态的副本管理策略:首先在靠近查询注入点的地方放置一个副本,当查询的频率提高或查询注入点的位置移动,则在靠近查询注入点的地方再寻找一个新的节点保存副本。这个新节点作为原来副本放置节点的孩子节点,它们组成一棵副本管理树。当源节点更新数据,副本管理树上的所有节点可以快速更新副本的内容;当查询的频率下降,副本管理树的根节点可以将对应的副本放置节点撤销。

文献[17]研究了节点移动的传感器网络中的查询式数据收集。由于每个节点都具有移动能力,传统的以数据中心的存储无法使用。针对海上油污泄漏的场景,设计了一种基于边界的数据复制方案(perimeter-based data replication)。在这个方案中,处于监测区域边界的节点负责感知新事件的时—空数据。而处于区域内部的节点负责数据的存储和复制,并提供对其他节点失效时的容错性。

1.2.3　基于双线结构的数据收集协议

对于基于双线结构的协议是最早由文献[18]提出的。在传统的以数据为中心的存储中,数据副本被存放在离散的节点上,从而造成访问困难。为了解决这个问题,文献[18]设计了一种基于双线结构的副本放置算法。在这种结构中,数据副本被放置在组成一条曲线的若干个节点上,而查询将沿另一条不平行的曲线搜索结果。当查询的曲线与数据副本放置的曲线相交,则查询可以获得需要的结果。这种结构能提供较好的数据汇聚操作,有利于节省节点发送数据的通信能耗;此外,还具有较强的健壮性,能抵御部分节点死亡造成的数据丢失。

但是,文献[18]的协议需要知道节点的位置信息。这样,网络中节点需要加装昂贵的 GPS 定位系统或采用复杂的定位协议来估算位置,增加了网络部署的困难。为了改进这个不足,文献[19]提出一种无须节点位置的新协议:首先,节点分布地组成若干个包括四条轴的闭合环路,然后由环路上的节点负责响应环路外的数据查询,而环路内的节点根据双线结构来负责响应环路内的数据查询。

2　内部事件驱动数据收集

在内部事件驱动数据收集中,根据节点对事件响应的方式可以继续分为两类,即基于阈值的数据收集和基于语义的数据收集。基于阈值的数据收集中,节点根据感知到的监测数据的大小来判断事件是否发生,如果监测数据大于某个阈值则将数据传送给 sink,否则就不传送数据;而基于语义的数据收集中,节点更关心事件的内涵,不是简单地根据某个阈值来进行数据收集。

2.1　基于阈值的数据收集协议

文献[20]针对由于传感器的错误所导致的事件检测信息的不准确性,研究相应的容错算法。根据事件的空间相关性和时间相关性,提出了一种以局部检测为主的分布式事件检测机制。该机制通过检验传感器本地采样值构成的时间序列与事件随机过程统计特征的符合程度来实现容错。

文献[21]针对环境监测中的事件驱动数据收集,如某个地区的温度超过一个预定义的阈值则报告用户。首先,感知到事件发生的节点组成一个簇,然后簇首采集簇内节点的数据并进行压缩,最后将压缩后的报告发送给 sink 节点。

文献[22]的研究背景与文献[20]相似,也是寻找有效降低环境监测应用中节点发送数据量的办法。首先,所有节点被划分为多个簇。然后,每个节点判断自己的感知数据是否与上次发送给簇首的数据有明显不同,如果是,则发送给簇首;否则不进行任何操作。此外,每个簇首可以在一段时间没有收到报告后进入睡眠状态以节省能量。

以上工作均是基于单阈值的事件报告机制。文献[23]分析了基于单阈值的事件驱动数据收集的缺点,指出在复杂环境中(如矿井),事件的发生需要用全方位的环境信息来描述,而不能只局限于设定一个条件阈值,因此提出一个新的事件驱动数据收集协议:首先以能量有效的方式收集网络环境中相关数据的时间序列,然后通过匹配收集到的数据为一个时空数据模式,检测复杂事件是否发生。

事件被发现后,如何有效地进行传输也是研究的重点。文献[24]针对事件发生时大量数据向 sink 节点传输会导致拥塞和延迟的问题,提出一个基于网络编码的机会多路径路由来解决:首先根据延迟和拥塞的影响定义一个路由量度(routing metric),以此建立节点到 sink 的梯度域(gradient field);当有事件发生时,节点采用随机线性网络编码(random linear network coding)压缩数据包,同时根据路由梯度和链路质量分配下游节点相应的转发概率;最后,数据包被传输,sink 节点接收到后进行解码。

文献[25]注意到多个节点感知到事件时,产生的数据存在相似和冗余,但传统的利用节点间的时—空相关性来汇聚数据的做法会导致信息质量下降。因此,该文提出构造一棵最小代价路由树来满足给定的信息质量约束。这个问题被证明是 NP 难的。因此首先考虑每个感知到事件的节点的信息质量贡献,设计一个能量有效的基于柱状图且拓扑感知的数据汇聚模型;然后提出一个贪婪启发式算法来近似和剪枝出一条最小代价数据汇聚路由路径。

文献[26]针对事件监测应用的特点,提出一种基于栅格的感知调度方法:首先对目标环境进行栅格划分,然后由栅格内的节点选举出代表,轮流地执行监测任务。这个方案可以获得与节点密度成正比的能量保存度,同时可以通过改变栅格的大小来实现负载平衡。

文献[27]研究了如何在保证最佳事件监测率的条件下有效降低节点的能量耗费,进而提出了一个节点选择算法,选择网络中尽量少的节点来完成事件监测,让其他节点进入睡眠状态以保存能量。其首先证明了从网络的 n 个节点中选择 p 个节点来完成所有可能事件的监测是属于 NP 难的问题;然后将这个组合优化问题映射为求解一个加大搜索空间的 Stiefel 矩阵(Stiefel matrix),在求解该矩阵之后,再将结果映射回原问题空间;最后得到近似最优的节点选择方案。

传统的事件驱动数据收集协议中,往往假设网络中只有一个 sink 节点。因此,进行数据收集时,所有数据均向这个 sink 节点进行传输,容易出现拥塞、热区等问题,导致网络的性能受到影响。文献[28]研究部署多个 sink 节点来减少数据收集延迟以及延长网络生命周期。多个 sink 节点根据一定的模式在网络中移动,而每个感知到事件的节点将选择向离自己最近的 sink 节点发送数据,但是 sink 节点的数量并不是越多越好,sink 节点达到一定数量后,对网络性能提高的影响将趋于稳定。

2.2 基于语义的数据收集协议

目前,有关基于语义的数据收集的研究较少。因此针对用户只对事件的高层表示(或语义)感兴趣,而对感知数据不感兴趣的特点,研究如何进行语义收集。例如,文献[29]提出一个基于概率的上下文无关语法(probabilistic context free grammars)框架来推导数据的内涵。对于给定的训练数据,为了最大化推导概率,该框架采用基于贝叶斯公式的度量评价标准。

文献[30]针对一些普适应用(如动物活动识别、远程的病人健康监测)中,需要利用手持移动设备在不同地点连续采集事件信息的场景,提出一个以感知数据获取代价为基础的数据收集框架。在这个框架中,传感器节点不再盲目地发送数据给手持移动设备,而是由手持移动设备在综合考虑节点数据流是否符合需要的基础上,结合数据传输的通信代价来决定往哪些节点抽取数据。这样能有效减少网络中传输的数据流,从而减少网络中节点和手持移动设备的能量耗费。

3 不同数据收集协议的对比

为了能更清晰地了解以上不同种类数据收集协议的性能和应用范围,将不同数据收集协议在能量保存性能、迟延性能、可扩展性、可靠性、自适应性、算法复杂度等方面进行对比,结果如表 1 所示。

表 1 不同数据收集协议的对比

协议类型	能量保存	延迟性能	可扩展性	可靠性	自适应性	算法复杂度
基于事件内容的数据收集	低	较差	高	低	高	高
基于数据流的数据收集	低	较差	高	低	高	低
基于环的数据收集	高	较好	低	高	低	低
副本动态放置的数据收集	高	较好	低	高	高	高
基于双线结构的数据收集	高	较好	低	高	低	低
基于阈值的数据收集	高	较差	高	低	高	低
基于语义的数据收集	低	较差	高	低	高	高

由表 1 可以看到,基于事件内容的数据收集和基于数据流的数据收集在能量保存性能、延迟性能、可靠性等方面相对较低,但是它们的可扩展性和自适应性较好,能方便地应用于复杂的网络环境。

基于环的数据收集、副本动态放置的数据收集、基于双线结构的数据收集具有较高的能量保存性能,比较适应于要求网络长时间工作的场景。此外,它们的延迟性能较好,有利于网络中的数据及时送到 sink 节点进行处理。它们的优点还包括较高的可靠性,能在条件恶劣、节点容易死亡的环境中工作。但是它们的可扩展性较低,很难应用于网络规模动态变化的环境。

基于阈值的数据收集和基于语义的数据收集的延迟性能比基于环的数据收集要差,而且可靠性也有待提高,但它们的可扩展性和自适应性较好,能方便地应用于复杂的网络环境。

综上所述,各种数据收集协议具有不同的优缺点,因此可以根据具体应用的需求来决定采用哪种协议。例如,如果应用要求协议算法复杂度较低,且具有较高的能量保存性能和低延迟保证,但是对协议的可扩展性和自适应性要求不高,可以选择基于环或双线结构的数据收集协议。

4 结束语

本文对事件驱动数据收集的研究进展进行了系统地分析和总结。在无线传感器网络中,事件驱动数据收集是重要的研究领域。为了能保证在事件发生后数据能以低能耗、低延迟的方式传送到 sink 节点,需要在节点间的路由方式、数据副本的放置、事件内涵的提取等方面进行合理的设计。目前,以上领

域的研究取得了一定的进展,但是各个协议的综合性能仍有待提高,比如具有较好的能量保存和延迟性能应该不以较低的可扩展性为代价。因此,下一步的研究可以结合目前新出现的一些通信或数据处理技术(如协同通信技术、认知无线电技术、数据编码技术等)来进行研究,在巩固已有协议优点的前提下,不断改进存在的缺点。

参考文献:

[1] AKYILDIZ I F, SU W, SANKARASUBRAMANIAM Y, *et al*. Wireless sensor network: a survey[J]. Computer Networks, 2002,38(1):393-422.

[2] 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.

[3] 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.

[4] WANG Y C, HSIEH Y Y, TSENG Y C. Multiresolution spatial and temporal coding in a wireless sensor network for long-term monitoring applications[J]. IEEE Trans on Computers, 2009,58(6):827-838.

[5] CHENG R, BEN Kao, KWAN A, *et al*. Filtering data streams for entity-based continuous queries[J]. IEEE Trans on Knowledge and Data Engineering,2010,22(2): 234-248.

[6] FU Tao-yang, PENG W C, LEE W C. Parallelizing itinerary-based KNN query processing in wireless sensor networks[J]. IEEE Trans on Knowledge and Data Engineering,2010,22(5):711-729.

[7] GUANG Jin, NITTEL S. Towards spatial window queries over continuous phenomena in sensor networks[J]. IEEE Trans on Parallel and Distributed Systems,2008,19(4):559-571.

[8] MELIOU A, GUESTRIN C, HELLERSTEIN J M. Approximating sensor network queries using in-network summaries[C]//Proc of the 8th ACM/IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks. Washington DC: IEEE Computer Society, 2009: 229-240.

[9] ZHOU Deng-pan, GAO Jie. Opportunistic processing and query of motion trajectories in wireless sensor networks[C]//Proc of the 28th IEEE International Conference on Computer Communications. 2009: 1197-1205.

[10] 余建平,林亚平. 传感器网络中基于蚁群算法的实时查询处理[J]. 软件学报,2010,21(3):473-489.

[11] 崔艳荣,李克清. 传感器网络中基于蚁群优化的数据查询协议[J]. 软件学报,2010,21(4):793-801.

[12] XIE Lei, CHEN Li-jun, CHEN Dao-xu, *et al*. EEBASS: energy-efficient balanced storage scheme for sensor networks[C]//Proc of IEEE Global Telecommunications Conference. 2008:719-724.

[13] 李贵林,高宏. 传感器网络中基于环的负载平衡数据存储方法[J]. 软件学报,2007,18(5):1173-1185.

[14] 谢磊,陈力军,陈道蓄,等. 基于环结构的传感器网络多分辨率数据存储机制[J]. 软件学报,2009,20(12):3163-3178.

[15] YING Lei,LIU Zhen,TOWSLEY D,*et al*. Distributed operator placement and data caching in large-scale sensor networks[C]//Proc of the 27th IEEE Conference on Computer Communications. 2008:977-985.

[16] ISHIHARA S,SUDA T. Replica arrangement scheme for location dependent information on sensor networks with unpredictable query frequency[C]//Proc of IEEE International Conference on Communications. 2009:1-6.

[17] ANDREOU P, ZEINALIPOUR-YAZTI D, ANDREOU M, *et al*. Perimeter-based data replication in mobile sensor networks[C]//Proc of the 10th International Conference on Mobile Data Management: Systems, Services and Middleware. 2009:244-251.

[18] SARKAR R, ZHU Xian-jin, GAO Jie. Double rulings for information brokerage in sensor networks[J]. IEEE/ACM Trans on Networking,2009,17(6):1902-1915.

[19] LIN C H, KUO J J, TSAI M J. Reliable GPS-free double-ruling-based information brokerage in wireless sensor networks[C]//Proc of the 29th Conference on Information Communications. Piscataway, NJ: IEEE Press,2010:351-355.

[20] 曹冬磊,曹建农,金蓓弘. 一种无线传感器网络中事件区域检测的容错算法[J]. 计算机学报,2007,30(10):1770-1776.

[21] RIVERO-ANGELES M E, BOUABDALLAH N. Event reporting on continuous monitoring wireless sensor networks[C]//Proc of the 28th IEEE Conference on Global Telecommunications. Piscataway, NJ: IEEE Press,2009:3816-3821.

[22] BOUABDALLAH N, RIVERO-ANGELES M E, SERICOLA B. Continuous monitoring using event-driven reporting for cluster-based wireless sensor networks[J]. IEEE Trans on Vehicular Technology, 2009,58(7):3460-3479.

[23] LI Mo, LIU Yun-hao, CHEN Lei. Nonthreshold-based event detection for 3D environment monitoring in sensor networks[J]. IEEE Trans on Knowledge and Data Engineering,2008,20(12):1699-1711.

[24] TONG Jie, DU Zhi-gao, LIU Yi, *et al*. Intra-flow network coding based multipath routing protocol for event-driven wireless sensor networks[C]//Proc of the 5th International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Networks. Washington DC: IEEE Computer Society, 2009:62-69.

[25] TAN H X, CHAN M C, XIAO Wen-dong, *et al*. Information quality aware routing in event-driven sensor networks[C]//Proc of the 29th IEEE Conference on Information Communications. Piscataway, NJ: IEEE Press,2010:1703-1711.

[26] 胡湘华,杨学军. 面向事件监测的无线传感网感知调度[J]. 软件学报,2008,19(9):2413-2421.

[27] BAJOVIC D, SINOPOLI B, XAVIER J. Sensor selection for event detection in wireless sensor networks[J]. IEEE Trans on Signal Processing,2011,59(10):4938-4953.

[28] WANG Bin, XIE Dong-liang, CHEN Can-feng, *et al*. Deploying multiple mobile sinks in event-driven WSNs[C]//Proc of IEEE International Conference on Communications. 2008:2293-2297.

[29] GEYIK S C, SZYMANSKI B K. Event recognition in sensor networks by means of grammatical inference[C]//Proc of the 28th IEEE Conference on Computer Communications. 2009:900-908.

[30] MISRA A, LIM L. Optimizing sensor data acquisition for energy-efficient smartphone-based continuous event processing[C]//Proc of the 12th IEEE International Conference on Mobile Data Management. Washington DC: IEEE Computer Society,2011:88-97.