

物联网信息感知与交互技术

胡永利 孙艳丰 尹宝才

(北京工业大学计算机学院多媒体与智能软件技术北京市重点实验室 北京 100124)

摘要 信息感知作为物联网的基本功能,是物联网信息“全面感知”的手段。信息交互是物联网应用与服务的基础,是物联网“物物互联”的目的。随着物联网研究热潮的兴起,以传统无线传感器网络为核心的感知网络研究迅速升温,并在信息感知与交互方面取得了大量研究成果。文章分析了物联网信息感知与交互方面的最新研究进展,在信息感知方面,从数据收集、清洗、压缩、聚集和融合几个方面,梳理归纳了数据获取和处理的主要方法。在信息交互方面,提出了物联网信息交互的基本模型,分析总结了信息交互涉及的主要技术。在此基础上,讨论了物联网信息感知与交互研究的热点问题,包括新的感知技术、能效平衡、信息安全和移动感知网络等。最后,指出了物联网信息感知与交互技术发展面临的问题和挑战,展望了未来的研究方向。

关键词 物联网;信息感知;信息交互;无线传感器网络;压缩感知;能量高效

中图分类号 TP393 DOI号: 10.3724/SP.J.1016.2012.01147

Information Sensing and Interaction Technology in Internet of Things

HU Yong-Li SUN Yan-Feng YIN Bao-Cai

(Beijing Municipal Key Laboratory of Multimedia and Intelligent Software Technology,
College of Computer Science and Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124)

Abstract Information sensing is the basic function of Internet of Things (IoT), by which “Completely Sensing” is implemented. Information interaction is the goal of “Thing-to-Thing Interconnection” which supports the service and application of IoT. Along with the upsurge of IoT research and application, there are much research rapidly focus on the sensing network which is mainly based on the wireless sensor network. As information sensing and interaction have been deeply studied recently, it is necessary to summarize the latest progression. Firstly, the main information sensing methods, such as data collection, cleaning, compression, aggregation and fusion, are reviewed. Secondly, a basic information interaction model is proposed and the main information interaction techniques are discussed in detail. Thirdly, some active topics about information sensing and interaction, such as new sensing techniques, energy efficiency, security and mobile sensing network, are addressed. Finally, we present the challenges for the research of both information sensing and interaction, and point out the future work in this area.

Keywords Internet of Things; information sensing; information interaction; wireless sensor network; compressive sensing; energy-efficient

收稿日期:2011-09-18;最终修改稿收到日期:2012-02-20。本课题得到国家“九七三”重点基础研究发展规划项目基金(2011CB302703)和自然科学基金(61171169,61133003,60825203,60973057)资助。胡永利,男,1973年生,博士,副教授,主要研究方向为物联网信息处理、模式识别、多媒体技术。E-mail: huyongli@bjut.edu.cn。孙艳丰(通信作者),女,1964年生,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为多功能感知、模式识别、图像处理。E-mail: yfsun@bjut.edu.cn。尹宝才,男,1963年生,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为多功能感知、多媒体技术、虚拟现实、计算机图形学。

1 引 言

物联网是信息技术领域的一次重大变革,被认为是继计算机、互联网和移动通信网络之后的第三次信息产业浪潮。物联网是在互联网基础上延伸和扩展的网络,是通过信息传感设备,按照约定的协议,把任何物品与互联网连接起来,进行信息交换和通信,以实现智能化识别、定位、跟踪、监控和管理的一种网络。物联网的基本特征是信息的全面感知、可靠传送和智能处理,其核心是物与物以及人与物之间的信息交互。

信息感知是物联网的基本功能,但通过无线传感器网络等手段获取的原始感知信息具有显著的不确定性和高度的冗余性。信息的不确定性主要表现在:(1)不统一性。不同性质、不同类型的感知信息其形式和内容均不统一;(2)不一致性。由于时空映射失真造成的信息时空关系不一致;(3)不准确性。由于传感器采样和量化方式不同造成的信息精度差异;(4)不连续性。由于网络传输不稳定造成的信息断续;(5)不全面性。由于传感器感知域的局限性导致获取的信息不全面;(6)不完整性。由于网络和环境的动态变化造成的信息缺失。感知信息的冗余来源于数据的时空相关性,而大量冗余信息对资源受限的感知网络在信息传输、存储和处理以及能量供给方面提出了极大的挑战。因此,一方面需要研究信息感知的有效方法,对不确定信息进行数据清洗,将其整合为应用服务所需要的确定信息;另一方面,需要研究信息感知的高效方法,通过数据压缩和数据融合等网内数据处理方法实现信息的高效感知。

信息交互是物联网“物物互联”的目的,是物联网应用的基础。物联网信息交互与传统人机交互具有很大的不同,主要体现在:(1)物联网信息交互“用户”的泛在性。“物物互联”使物联网的信息交互无处不在,从而将信息交互用户扩展到所有联入网络的人、机、物等不同对象。(2)物联网信息交互是一种主动交互方式。在物联网应用中,信息交互不是被动的应答式交互,而是网络节点按需主动获取信息,并自主智能地处理感知信息的过程。(3)物联网信息交互的过程非常复杂。大量异质网络节点的参与,网络中海量信息的分布式存在,无线网络的动态性和不稳定性以及节点资源的局限性,使得物联网信息交互需要众多网络节点共同参与、相互协作,分布式执行才能完成。由于上述特点,需要研究物联网

信息交互理论和技术,建立信息交互模型,重点解决信息交互的能效平衡和交互适配问题,实现交互任务智能高效地完成。

随着物联网技术研究和应用的不断深入,物联网信息感知和交互研究取得了大量成果,但缺乏总结分析。本文分析了物联网信息感知和信息交互的研究进展,侧重于以无线传感器网络为核心的感知网络的相关技术和方法。首先,论述了信息感知和信息交互的研究现状,对现有技术和方法进行了梳理和归纳;然后,分析了物联网信息感知和交互研究的热点问题,论述了最新的研究进展;最后,指出了物联网信息感知和交互面临的问题和挑战,并对全文进行了总结。

2 信息感知

信息感知为物联网应用提供了信息来源,是物联网应用的基础。信息感知最基本的形式是数据收集,即节点将感知数据通过网络传输到汇聚节点。但由于在原始感知数据中往往存在异常值、缺失值,因此在数据收集时要对原始感知数据进行数据清洗,并对缺失值进行估计。信息感知的目的是获取用户感兴趣的信息,大多数情况下不需要收集所有感知数据,况且将所有数据传输到汇聚节点会造成网络负载过大,因此在满足应用需求的条件下采用数据压缩、数据聚集和数据融合等网内数据处理技术,可以实现高效的信息感知。下面在分析一般数据收集过程的基础上,讨论数据清洗、数据压缩、数据聚集和数据融合等信息感知技术。

2.1 数据收集

数据收集是感知数据从感知节点汇集到汇聚节点的过程。数据收集关注数据的可靠传输,要求数据在传输过程中没有损失。针对不同的应用,数据收集具有不同的目标约束,包括可靠性、高效性、网络延迟和网络吞吐量等。下面按照约束目标的不同对典型的数据收集方法进行分析讨论。

数据的可靠传输是数据收集的关键问题,其目的是保证数据从感知节点可靠地传输到汇聚节点。目前,在无线传感器网络中主要采用多路径传输和数据重传等冗余传输方法来保证数据的可靠传输。多路径方法^[1]在感知节点和汇聚节点之间构建多条路径,将数据沿多条路径同时传输,以提高数据传输的可靠性。多路径传输一般提供端到端(End to End)的传输服务。由于无线感知网络一般采用多跳路由,

数据成功传输的概率是每一跳数据成功传输概率的累积,但数据传输的每一跳都有可能因为环境因素变化或节点通信冲突引发丢包,因此构建传输路径是多路径数据传输的关键。数据重传方法^[2]则在传输路径的中间节点上保存多份数据备份,数据传输的可靠性通过逐跳(Hop by Hop)回溯来保证。数据重传方法一般要求节点有较大的存储空间以保存数据备份。

能耗约束和能量均衡是数据收集需要重点考虑和解决的问题。多路径方法在多个路径上传输数据,通常会消耗更多能量。而重传方法将所有数据流量集中在一条路径上,不但不利于网络的能量均衡,而且当路径中断时需要重建路由。为了实现能量有效的数据传输,研究者基于多路径和重传方法,提出了许多改进的数据传输方法。文献[3]提出的 TSMP 多路径数据传输方法,在全局时间同步的基础上,将网络看作多通道的时间片阵列,通过时间片的调度避免冲突,从而实现能量有效的可靠传输。文献[4]提出的 Wisden 数据传输方法,在网络中的每个节点都缓存来自感知节点的数据及数据的连续编码。如果数据的编码中断则意味着该编码对应的数据没有传输成功,这时将该数据编码放入一个重传队列,并通过逐跳回溯的方法重传该数据。当网络路由发生变化或节点故障产生大规模数据传输失败时,逐跳重传已经不能奏效,这时则采用端到端的数据传输方法。这种端到端和逐跳混合的数据传输方式实现了低能耗的可靠传输。

对于实时性要求高的应用,网络延迟是数据收集需要重点考虑的因素。为了减少节点能耗,网络一般采用节点休眠机制,但如果休眠机制设计不合理则会带来严重的“休眠延迟”和更多的网络能耗。例如,当下一节点处于休眠状态时,当前节点需要等待更长的时间,直到下一节点被唤醒。为了减小休眠延迟并降低节点等待能耗,DMAC 方法^[5]和 STREE 方法^[6]使传输路径上的节点轮流进入接收、发送和休眠状态,通过这种流水线传输方式使数据在路径上像波浪一样向前推进,从而减少了等待延迟。文献[7]提出的 TIGRA 方法对上述方法做了进一步改进,要求到汇聚节点具有相同跳数的节点同步进入休眠、接收和发送状态,从而将流水线式数据传输由线扩展到面,实现了更高效的传输。

网络吞吐量是数据收集需要考虑的另一个问题。数据收集“多对一”的数据传输模式以及基于 CSMA 的 MAC 层控制机制,很容易产生“漏斗效应”,

即在汇聚节点附近通信冲突和数据丢失现象严重,从而导致网络吞吐量降低。针对这种网络负载不平衡问题,需要采用新的 MAC 控制机制。文献[8]提出的 Funneling-MAC 方法,在汇聚节点周围采用一种 TDMA 协议,为每个数据链路都分配相应的时间片。为了处理突发事件,在一些预留的时间片内则采用 CSMA 协议。实验表明,该方法有效提高了网络吞吐量。文献[9]提出了一种阻塞控制和信道公平的传输方法。该方法基于数据收集树结构,通过定义节点及其子节点的数据成功发送率,按照子树规模分配信道资源,实现了网络负载均衡。

数据收集是物联网最基本也是最广泛的应用,目前已经提出了许多行之有效的数据收集方法,进一步的研究需要在满足数据传输可靠性的前提下,探索能量有效和能量均衡的数据收集方法。同时,针对不同的物联网应用,需要研究和分析数据收集不同约束目标之间的关系,实现约束目标的灵活适配和优化选择。

2.2 数据清洗

数据收集的目的是获取监测目标的真实信息,然而由于网络状态的变化和环境因素的影响,实际获取的感知数据往往包含大量异常、错误和噪声数据,因此需要对获取的感知数据进行清洗和离群值判断,去除“脏数据”得到一致有效的感知信息。对于缺失的数据还要进行有效估计,以获得完整的感知数据。根据感知数据的变化规律和时空相关性,一般采用概率统计、近邻分析和分类识别等方法,在感知节点、整个网络或局部网络实现数据清洗。

概率统计方法需要建立数据的统计分布模型,通过计算观测值在分布模型下的概率来判定离群值。对于具有明确分布特性的数据,通常采用参数估计方法建立统计分布模型,常用的有高斯分布。例如,文献[10]利用节点数据的空间相关性,通过比较节点观测值与近邻节点观测值中位数的误差实现离群值的判定。但该方法没有考虑数据的时间相关性。文献[11]同时考虑了数据的时间和空间相关性,观测值既与邻居的观测值比较,又与历史数据比较,综合判断离群值。针对数据非高斯分布的情形,文献[12]采用对称稳定分布模型,对有脉冲噪声的节点观测数据进行滤波,获得了满意的效果。由于参数估计方法需要根据先验知识建立统计分布模型,但实际上一般不易得到数据的分布特征。因此,出现了许多非参数统计的数据清洗方法。例如基于直方图的方法^[13]和基于核函数的方法^[14]。前者通过观测值的频

率统计获得直方图分布,根据观测值是否落于给定的频率范围来判定离群值。后者采用核函数估计观测值分布,将具有较低概率的观测值判定为离群值。基于概率统计的数据清洗方法能体现数据的分布特征,具有计算简单、准确性高等特点,但其缺点是先验分布不好确定,离群值阈值的设置依赖于人为经验。

近邻分析方法利用感知数据在空间上的相关性,通过定义近邻节点观测值的相似度实现离群值判断。文献[15]提出了一种全局离群值检测方法,该方法基于节点观测值相似度的定义,将局部可疑离群值广播发送到近邻节点进行验证,如果近邻节点确认其为离群值,则继续通过广播方式向其它近邻节点寻求确认,最终实现全局离群值的检测。该方法采用广播方式发送信息,因此适用于不同的网络结构,但其通信开销较大。为了减少通信开销,文献[16]采用汇集树网络结构实现了全局离群值的检测。在汇集树中每个节点将其子树中的部分数据发送给父节点,并最终汇集到汇聚节点。汇聚节点从收到的数据中,选择最大的若干个观测值向所有节点查询它们是否为全局离群值。如果存在节点否认某观测值为离群值,则该节点的子树将再次发送部分数据到汇聚节点。重复上述过程,直到所有节点同意某观测值为离群值。文献[17]基于分簇网络结构提出了一种全局离群值检测方法。该方法基于空间相关性将节点划分为若干簇,簇头将簇内的数据摘要发送到汇聚节点,汇聚节点通过比较某个簇的簇内数据离差与所有簇的平均簇内数据离差实现离群值判定。近邻分析方法不需要对数据的分布进行估计,并且充分利用了数据的时空相关性,是一种能体现数据自身特点的数据清洗方法。但该类方法在划分邻域时需要定义节点观测数据的相似度量,对于多源异构感知数据,定义理想的相似度量比较困难。另外,选择什么网络结构以及如何应对网络结构的动态变化是近邻分析方法需要处理的问题。

分类识别方法将数据清洗问题看作模式识别问题,采用经典的机器学习和分类识别方法,例如支持向量机(SVM)、贝叶斯网络等方法判定离群值。文献[18]利用节点一段时间的历史数据训练 SVM 模型,实现局部离群值的判定。基于贝叶斯网络的方法^[19]将节点数据的时空相关性,描述为数据的概率依赖关系,基于历史观测数据学习贝叶斯网络参数,通过贝叶斯概率推理实现离群值判定。由于基于分类识别的数据清洗方法充分利用了样本信息,因此

在实际中取得了较好的应用效果。但对于分布式感知网络和多源异构感知数据,分类识别方法在实现时还有一些问题需要进一步研究。例如,基于 SVM 的方法需要研究核函数的确定方法以及适用于资源受限节点的高效算法。基于贝叶斯网络的方法需要研究和解决节点数量增加时,大规模贝叶斯网络的建模和参数学习问题。

与数据清洗密切相关的的一个问题是感知数据中存在缺失值的问题。如果将缺失值看作异常值,则利用数据清洗方法也能实现缺失值的识别和剔除。但在要求数据完整性的应用场合,则需要对缺失值进行有效估计。针对感知数据的缺失值问题, Pan 等人^[20-21]提出了基于线性插值模型和多元回归模型的估计方法,取得了较好的实验结果。

虽然目前已经提出了许多数据清洗方法,但面向复杂的物联网应用,由于网络受环境因素影响大,网络状态不稳定,网络资源受限,现有方法与实际应用要求还有一定差距。因此,需要进一步研究有效的物联网数据清洗方法,研究和解决数据清洗的网络能耗和负载均衡问题,研究能处理高维多源异构数据且适用于大规模网络应用的数据清洗方法。

2.3 数据压缩

对于较大规模的感知网络,将感知数据全部汇集到汇聚节点会产生非常大的数据传输量。由于数据的时空相关性,感知数据包含大量冗余信息,因此采用数据压缩方法能有效减少数据量。然而由于感知节点在运算、存储和能量方面的限制,传统的数据压缩方法往往不能直接应用。因此,针对物联网应用的特点,研究者提出了许多适合无线感知网络的数据压缩方法。

在无线传感器网络应用中,研究者主要考虑节点的资源限制,提出了一些简单有效的数据压缩算法。例如,基于排序的方法^[22]利用数据编码规则实现数据压缩,而基于管道的方法^[23]采用数据组合法实现数据压缩。但这类算法没有充分利用数据自身的相关性,所以压缩效率较低。文献[24]基于节点数据的时间相关性,提出了一种基于历史数据的压缩方案。该方案从历史数据中提取数据基信号,并利用基信号的线性映射表示数据,实现数据压缩。文献[25]认为不同节点往往采集不同类型的数据,如果所有节点采用相同的压缩率,数据将产生不同程度的失真。因此,提出了一种基于动态带宽分配的数据压缩方案。在该方案中,汇聚节点先确定上一轮数据收集每个节点的通信带宽和压缩质量,然后为各个节

点计算出理想的通信带宽,从而为数据失真度高的节点分配更多的通信带宽,即通过为不同的节点分配不同的压缩率,实现更高效的数据压缩。

由于传统基于变换的数据压缩方法在信号处理方面取得的成功,许多研究者试图将传统数据压缩方法应用于物联网感知数据的压缩,其中最热门的是基于小波变换的压缩方法。文献[26]先在单个传感器节点对数据进行小波压缩,然后将压缩数据传送到汇聚节点进行集中处理,减少了网络通信开销。DIMENSIONS 算法^[27]采用层次式分簇路由协议,感知节点对数据进行小波压缩后发送到簇头节点。簇头节点对所收集的数据再进行小波压缩,并继续发送到上一层的簇头节点。重复上述操作,直到数据传输到汇聚节点,在汇聚节点进行多层解码,实现高效的数据压缩。

物联网感知网络的分布式特性,决定了分布式数据压缩方法具有更高的压缩效率。不同于上述在单个节点或汇聚节点的数据压缩方式,分布式压缩方法一般需要多个节点的协同工作完成数据压缩。Ciancio 等人^[28]在无线传感器网络数据的分布式小波压缩方面做了大量研究工作,深入研究了分布式小波压缩的网络能耗问题,分析了局部小波系数量化对数据重构失真度的影响,在此基础上提出了一种能量优化的分布式小波压缩方法。文献[29]认为传统的小波变换不能直接应用于空间部署不规则的无线传感器网络,因此提出了一种分布式不规则小波变换方案,以 Haar 小波为例给出了一个分布式小波变换方法,并在无线传感器网络应用中取得了较好的数据压缩效果。

现有的研究表明,分布式数据压缩技术在无线感知网络数据收集应用中具有良好的性能,但面向大规模网络应用需求,还有许多理论和技术问题需要探讨。例如,分布式数据压缩的能量有效和能量均衡问题,分布式数据压缩的鲁棒性和误差控制问题以及多节点协同的分布式数据压缩问题等。

2.4 数据聚集

数据收集和压缩方法试图从感知网络获取全部或近似全部的感知信息,然而在大多数应用场合,信息感知的目的是获取一些事件信息或语义信息,而不是所有的感知数据。因此,多数情况下不需要将所有感知数据传输到汇聚节点,而只需传输观测者感兴趣的信息。下面的数据聚集和数据融合,就是在满足应用要求的情况下,从原始感知数据中选择少量数据或提取高层语义信息进行传输,从而减

少网络数据传输量。

数据聚集(Data Aggregation)就是通过某种聚集函数对感知数据进行处理,传输少量数据和信息到汇聚节点,以减少网络传输量。数据聚集的关键是针对不同的应用需求和数据特点设计适合的聚集函数。常见的聚集函数包括 COUNT(计数)、SUM(求和)、AVG(平均)、MAX(最大值)和 MIN(最小值)、MEDIAN(中位数)、CONSENSUS(多数值)以及数据分布直方图等。Gehrke 等人对无线感知网络的数据聚集做了大量研究工作,提出了聚集函数的容错和可扩展算法,并在此基础上实现了一个 COUGAR 数据感知系统^[30]。文献[31]提出了一种在分布式无线感知网络环境下低能耗的聚集函数实现方法,研制了一个感知数据库系统 TinyDB。文献[32]研究了无线感知网络的数据聚集实现方法,提出一种低能耗的聚集树构造算法,并指出无线通信机制对聚集函数的计算性能具有很大影响。文献[33]将无线感知网络中的某些节点作为聚集器,这些聚集器从其它感知节点收集原始数据,并根据远程用户的查询请求进行数据聚集处理,将聚集函数的计算结果反馈给用户。文献[34]提出的数据聚集结构 Q-Digest 树,可以对无线感知网络进行多种数据聚集操作,包括分位数、出现频率最高的观测值和数据分布直方图等。

数据聚集能够大幅减少数据传输量,节省网络能耗与存储开销,从而延长网络生存期。但数据聚集操作丢失了感知数据大量的结构信息,尤其是一些有重要价值的局部细节信息。对于要求保持数据完整性和连续性的物联网感知应用数据聚集并不适用。例如,突发和异常事件的检测,数据聚集损失的局部细节信息可能会导致事件检测的失败。

2.5 数据融合

数据融合(Data Fusion)是对多源异构数据进行综合处理获取确定性信息的过程。在物联网感知网络中,对感知数据进行融合处理,只将少量有意义的信息传输到汇聚节点,可以有效减少数据传输量。文献[35]对无线传感器网络中的数据融合技术做了系统综述。按照数据处理的层次,数据融合可分为数据层融合、特征层融合和决策层融合。对于物联网应用,数据层融合主要根据数据的时空相关性去除冗余信息,而特征层和决策层的融合往往与具体的应用目标密切相关。

在数据层采用传统的数据融合方法,例如概率统计方法、回归分析和卡尔曼滤波等,可以消除冗余

信息,去除噪声和异常值.文献[36]提出的分布式融合方法,采用极大似然估计实现了局部感知数据的估计,消除了数据异常,并解决了不同步数据的融合问题. Bayes 方法也是数据融合常用的方法. Yuan 等人^[37]在研究基于簇结构的数据融合时,为了解决数据集中簇头节点的数据冲突问题,采用 Bayes 方法估计发送数据的节点数量. 为了提高 Bayes 数据融合的计算效率, Shah 等人^[38]实现了后验概率的分布式计算. 基于原始数据的回归分析,可以通过少量数据获得感知数据全局或局部的估计. 例如,文献[39-40]建立了感知数据的回归模型,通过模型的回归计算大幅减少了数据传输量. 将传统信号处理的各种滤波方法应用于感知数据的融合,可以有效去除噪声、消除数据冗余. 常见的方法有漂移均值滤波、卡尔曼滤波和粒子滤波等. Jin 等人^[41]将漂移均值滤波用于观测值的数据处理以及事件和事件边界的估计. 卡尔曼滤波在观测值预测^[42]、上下文信息预测^[43],甚至 MAC 层数据帧大小预测^[44]等方面均有应用. 但卡尔曼滤波不能很好地处理非高斯噪声和低采样率的数据,因此粒子滤波方法被引入无线传感器网络的数据分析和处理中,特别是节点定位和跟踪方面. 例如,文献[45]采用粒子滤波方法实现了基于网络几何属性的目标跟踪.

针对来自多源异质网络节点的多类型不确定性数据,在特征层或决策层采用 D-S 证据理论、模糊逻辑、神经网络及语义融合等技术,可以实现事件检测、状态评估和语义分析等高层决策和判别. 文献[46]采用 D-S 证据理论实现了网络路由状态的分析,给出了路由是否需要重建的判别. 由于模糊逻辑能很好地处理推理和决策中的不确定性因素,因此非常适合物联网不确定性信息的处理. 实际上,模糊逻辑在节点定位跟踪^[47]、簇头选择^[48]、路由构建^[49]以及 MAC 存取控制^[50]等方面均有应用. 神经网络能够将不确定的数据通过学习转化为系统理解的形式,且适合大规模并行处理. 因此,神经网络可应用于物联网多节点感知数据的融合. 例如,文献[51]将神经网络用于目标识别系统的多传感器数据的融合. 语义融合技术是基于数据语义描述的高层数据融合方法. 该方法一般从感知数据提取抽象语义,通过语义的模式匹配实现状态监测或分类识别. Friedlander 等人^[52]最早提出了语义融合方法,并将其应用于传感机器人的状态识别.

除了研究数据融合方法之外,物联网数据融合还要考虑网络的结构和路由,因为网络结构和路由

直接影响数据融合的实现. 目前在无线感知网络中经常采用树或分簇网络结构及路由策略. 基于树的数据融合一般是对近源汇集树、最短路径树、贪婪增量树等经典算法的改进. 例如,文献[53]提出的动态生成树构造算法,通过目标附近的节点构建动态生成树,节点将观测数据沿生成树向根节点传输,并在传输过程中对其子生成树节点的数据进行融合. 经典的分簇协议 LEACH^[54]支持簇头节点的数据融合,但 LEACH 并未给出具体的融合方法. PEGASIS 协议^[55]对 LEACH 的数据融合进行了改进,采用了链式结构获得了更好的融合性能. 但 PEGASIS 协议链的长度与节点数量有关,对于规模较大的网络会产生较大的延迟. PEDAP 协议^[56]进一步发展了 PEGASIS 协议,通过构造最小汇集树,将子节点的数据包融合为单个数据包,减少了网络传输量.

数据融合能有效减少数据传输量,降低数据传输冲突,减轻网络拥塞,提高通信效率. 因此,数据融合已成为物联网信息感知的关键技术和研究热点. 但对于大规模网络应用,数据融合在理论和应用上还需要进一步研究,主要包括以下几个方面:(1)能量均衡的数据融合. 能耗不均衡造成的能量空洞现象已引起了许多研究者的关注,但对于大规模网络还需要研究有效的解决方案;(2)异质网络节点的信息融合. 异质网络节点的感知信息具有时间不同步,采样率不一致以及测量维数不匹配等不确定性. 如何融合异质网络节点的不确定性数据是一个难点问题;(3)数据融合的安全问题. 面向物联网应用,如何解决数据融合中的信息安全问题,特别是有损数据融合的安全性问题,是数据融合需要解决的关键问题之一.

3 信息交互

物联网信息交互是一个基于网络系统有众多异质网络节点参与的信息传输、信息共享和信息交换过程. 通过信息交互物联网各个节点智能自主地获取环境和其它节点的信息. 虽然已有的研究工作对传统信息系统的人机交互理论进行了深入研究,并提出了完整的信息交互模型,但对于物联网信息交互目前还没有成熟的理论体系. 下面根据经典的信息交互模型,提出物联网信息交互的基本模型,并在此基础上对信息交互的相关技术进行综述.

3.1 物联网信息交互模型

通过对大型信息系统人机交互过程的深入研

究,文献[57]提出了描述用户和信息系统及其内容的信息交互模型,该模型认为信息交互是由用户、系统和内容3个基础对象之间的交互共同完成,其中用户使用信息系统的根本目的是利用系统的内容,但用户要成功获取内容,必须利用系统提供的功能进行相应的系统操作才能完成,而内容是以系统为载体的信息呈现,是面向不同应用的信息展示.基于上述信息交互模型,结合物联网的特点,本文提出如图1所示的物联网信息交互模型,该模型的基础对象由用户、网络和内容三部分组成.与传统信息交互模型中用户的含义不同,这里的用户是广义的用户,既包括传统的人机交互用户,也包括汇聚节点、簇头节点、路由节点和一般网络节点.物联网信息交互的系统是指感知网络本身,即包括信息感知单元、运算和存储单元以及能量单元的整个网络系统.而以物联网网络系统为载体的信息空间则构成信息交互的内容,包括网络节点的各种感知数据、网络的状态信息以及用户感兴趣的高层语义和事件信息.物联网信息交互实际上是用户、网络和内容三者之间的交互过程,例如上面的信息感知过程实际上是汇聚节点通过感知网络获取节点感知信息的交互过程.下面就物联网信息交互中用户与网络、网络与内容以及用户与内容的交互技术分别进行分析讨论.

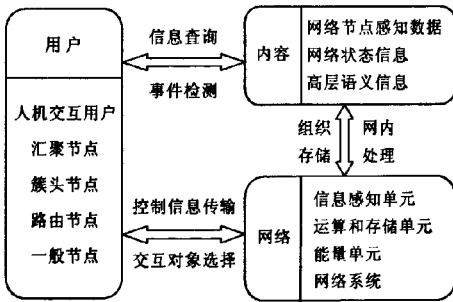


图1 物联网信息交互模型

3.2 用户与网络的信息交互

用户与网络系统的信息交互是指用户通过网络提供的接口、命令和功能执行一系列网络任务,例如时钟同步、拓扑控制、系统配置、路由构建、状态监测、代码分发和程序执行等,以实现感知信息的获取、网络状态监测和网络运行维护.物联网的各种应用都离不开用户与网络的信息交互,例如信息感知中的数据收集、数据压缩和数据融合就是用户通过网络的感知功能、运算功能和传输功能获取信息的过程.用户与网络信息交互的一般模式是用户通过网络发出指令或控制信息,相关节点收到相应的指

令后分布式地执行,并将执行的结果通过网络反馈给用户.下面重点分析用户与网络交互的关键环节,包括控制信息的传输和交互对象的选择.而网络将交互结果反馈给用户的过程依赖于不同的应用,在上述的数据收集等应用中已经有所叙述,在此不再详述.

3.2.1 控制信息的传输

控制信息的传输是将数据采集、查询命令、网络配置和程序代码等信息由汇聚节点传输到网络各个节点的过程.与前面的数据收集相反,控制信息的传输是从汇聚节点到感知节点“一到多”的数据传输.控制信息的传输首先要求高可靠性,其次一些数据采集和查询命令还要求低延迟.而对于较大规模的网络,能耗也是需要考虑的问题.目前,大部分控制信息传输协议都是基于传统 Ad hoc 网络的洪泛(flooding)和谣传(gossiping)协议建立的.

洪泛采用广播方式传输信息,即每个节点将收到的信息发送给邻居节点,直到达到设定的最大跳数.洪泛具有高可靠性,但其广播方式会导致信息的重复发送.因此,研究者提出了各种改进方案.文献[58]基于洪泛提出了一种 LMPB 协议,在减少数据重复传输的同时尽可能地平衡网络能耗.在该协议中,每个节点在传输消息时,只向下传输第一次收到的消息并做标记,当收到已传输过的消息时则不再传输.为了平衡信息传输的网络能耗,每个节点在消息传输过程中不断计算和更新自身的能量状态值,当一个节点向邻居节点传输消息时,只有能量状态最佳的节点会继续向下传输该消息.虽然 LMPB 协议减少了数据的重复传输,但数据传输的可靠性有所降低.针对该问题,文献[59]提出了一种提高信息传输可靠性的 RBP 协议.在此协议中,每个节点同样只传输第一次收到的消息,同时为了提高信息传输的可靠性,当一个节点收到消息时,根据其邻居节点成功接收该消息的比例以及节点所在局部网络的节点密度,决定是否要向下传输该消息.当节点局部密度比较低时,则节点传输消息以提高消息成功接收的比例,否则不传输消息以适当降低该比例.

谣传通过设定一定的概率阈值将收到的消息发送到较高概率的邻居节点,以避免消息的重复发送,但这样会降低信息传输的可靠性,而且对于不稳定的无线网络概率阈值的设定比较困难.针对谣传协议的问题,文献[60]提出的 Smart Gossip 协议,在保持信息可靠传输的基础上减少了传输能耗.不同于谣传采用固定的概率阈值,Smart Gossip 采用自

适应的阈值来确定节点是否传输消息。节点按照消息的来源和消息传输的次序,将其邻居节点分为父节点、兄弟节点和子节点三个集合。给定信息传输的可靠性要求,则可以估计出每一跳数据可靠传输的上界。根据该上界和父子节点集合的大小,计算出该节点传输消息的概率,从而在满足总体可靠性的条件下,实现每个节点按照合适的概率传输消息,最终节省数据传输开销。

洪泛和谣传可以实现控制信息的全局传输,但对于程序分发和系统配置升级等大数据量的信息传输,全局传输的代价太高,此时可以采用数据传输量较少的局部传输方案。文献[61]提出的 Trickle 协议,节点会向邻居发送其程序的摘要信息,当一个节点收到邻居节点的程序摘要时会与自身的摘要比较,如果发现邻居程序的摘要比较旧,则该节点会将自身的程序发送给该邻居节点;否则向邻居节点发送其程序摘要,以激发邻居节点将程序发送过来。同时,为了节省能量消耗,在一个程序升级周期内,设定摘要发送的最大次数,当达到最大次数则不再发送程序摘要直到下一个升级周期到来。一般节点的下一次升级周期设定为接收到两次摘要的最小间隔,以便下一次在最短时间内获得成功的升级。

通常节点的休眠机制会对信息的传输产生延迟,因此控制信息的传输还需要考虑节点休眠机制带来的影响。文献[62]提出了一种适应节点休眠机制的 RBS 协议。在该协议中,节点将第一次收到的消息即时发送给处于活动状态的邻居,当节点发现其邻居丢失了某条消息或处于休眠状态时,则向下传输该消息。在发送消息的同时,节点将已成功发送的邻居列表传送给下一节点,这样下面的节点会迅速知道哪些节点已经收到该消息,以便对没有收到消息的节点进行重发。同时,为了节省能量,节点在一个时间片内只向处于活动状态的邻居发送一次消息,即认为处于激活状态的邻居均能成功接收到消息,否则等待下一时间片重新发送消息。

控制信息的传输是物联网信息交互和应用服务实现的关键环节。现有的研究工作大多是针对较小规模的网络应用,在洪泛和谣传协议基础上的改进方案。对于大规模网络应用,控制信息的传输还存在许多问题需要探讨,例如控制信息多跳传输的可靠性问题、大规模信息传输的能量问题和信息传输的延迟问题等。

3.2.2 信息交互对象的选择

为了保障网络能可靠持久地工作,在部署无线

感知网络时,实际部署的节点比实现网络覆盖或完成交互任务的节点要多,因此在信息交互时一般不需要所有网络节点参与,而是在满足任务要求的前提下,选择合适的节点子集来执行任务,这样可以将其余节点设定为休眠状态,以降低网络能耗。信息交互对象的选择一般以任务需求、目标区域覆盖以及能量有效作为目标约束。

以交互任务需求为目标约束的对象选择方法,选择节点的原则是能够有效全面地完成交互任务。一般通过定义节点、局部网络或整个网络的任务执行效用函数来衡量任务的完成程度,并以此作为节点选择的优化目标。文献[63]提出的基于简单效用函数的节点选择方法,将节点分为空闲、感知、路由、感知或路由四种角色,节点根据其效用函数的计算结果选择自己要承担的角色,并通过相互协调完成交互任务。该方法的优点是效用函数计算简单,但缺点是没有考虑网络部署的空间特性。文献[64]提出了一种以总的效用最大且能量消耗最小为目标的节点选择方法。该方法采用简化的线性效用函数,在求解时要求每个节点的输出流数量不能超过输入流数量,并且要求节点在感知信息和传输数据时能量不能耗尽。该方法在考虑网络部署的情况下获得了优化的效用函数。文献[65]提出的信息驱动的节点选择机制,定义信息效用度量来评价节点的信息贡献,选择其中贡献最大的节点执行任务。该方法在实现了最大化信息收益的同时,获得了较小的延迟。文献[66]将节点的可信度融入了节点的选择算法,通过建立节点的可信模型获得整个网络的可信域,从而在可信域范围内综合考虑节点的信息贡献及通信开销来选择节点。但该方法在建立可信域时开销较大。

基于目标区域覆盖的对象选择方法以信息交互目标区域的网络覆盖为约束,通过优化的方式选择节点。文献[67]提出的基于覆盖控制的节点选择算法,要求未被选择的节点进入休眠状态后,网络的覆盖控制依然得到保障。算法实现时,每个节点会周期性地比较自身与邻居节点的覆盖范围,如果其覆盖范围包含于邻居节点的覆盖范围,则该节点进入休眠状态。文献[68]将所有网络节点划分为多个能完全覆盖目标区域的集合,任一时刻只有一个节点集合处于活跃状态。这样就将节点的选择问题转换为多个节点集合的优化调度问题,并通过最大化网络生存期实现求解。文献[69]提出的基于网格的节点选择方法,将覆盖区域用一个网格来表示,网格的交

叉点代表数据采集点,选择的节点集合要求能覆盖所有数据采集点.在求解时该方法采用分布式算法减少了网络能耗.文献[70]提出的 CCP 协议可以满足不同网络覆盖的要求.该协议将节点工作状态分为休眠、侦听和活动 3 种,处于活动状态的节点会定期发送自身的状态信息给邻居节点,这样节点可以通过收集邻居的状态来决定自己的状态.该方法具有灵活可调的网络覆盖率,因此特别适用于大范围、动态变化的网络.

能量有效的对象选择方法,以选择的节点集合能量负载均衡和网络生存期延长为约束目标.文献[71]对能量有效问题进行了深入研究,提出了多种延长网络生存期的方法,其中不相交子集覆盖控制方法将网络生存期的延长作为节点选择的约束.为了提高能量效率,文献[72]综合考虑近邻节点的剩余能量和簇头节点与近邻节点间的信道状态,提出了一种协同节点选择方案,在实现能量平衡的基础上降低了总能耗.

交互对象的选择直接影响着信息交互任务能否完成以及完成的质量.目前,面向不同的应用已经提出了许多节点选择算法,但现有方法一般都假设网络部署在平面空间,并且节点的覆盖范围通常采用圆形区域,然而实际网络通常都部署在复杂的三维空间里,节点的通信范围受环境因素的影响很大,因此需要结合实际情况研究有效的信息交互对象选择方法.

3.3 网络与内容的信息交互

网络与内容的信息交互主要指以网络基础设施为载体的内容生成和呈现,具体包括感知数据的组织和存储以及面向高层语义信息的数据聚集和数据融合等网内数据处理.关于网内数据处理的相关技术在信息感知部分已有叙述,下面主要分析感知数据在网络中的存储和组织技术.

按照数据在网络中的存储位置可以把数据存储方式分为外部存储和局部存储.外部存储指所有感知数据都汇集到汇聚节点并存储,而局部存储则将感知数据保存在感知节点本地.外部存储的数据集中存储方式便于数据管理和数据查询,但将所有数据传输到汇聚节点会产生非常大的传输量.局部数据存储虽然不需要传输大量数据,但数据管理复杂,数据查询成本高,且感知节点有限的存储空间以及节点易于失效等因素会对数据的可用性产生影响.

针对外部存储和局部存储的缺点,研究者提出了以数据为中心的存储方式,即按照某种规则将数

据分布式保存在网络中的某些节点上.由于这种方式符合无线感知网络的特点,因此已成为无线感知网络数据存储和管理的主流技术.实现以数据为中心的数据存储要根据数据的网络分布特性,设计便于数据管理和查询的网内数据存储规则.在 DIMENSIONS 小波数据压缩方法^[27]中,数据在网络中被组织成四分树结构的金字塔,形成从底层到顶层,由具体到概括的数据存储形式,这种形式可以提供多分辨率的数据存储和访问.文献[73]将用户感兴趣的信息,通过 Hash 函数散列到网内的一个地理位置附近的节点上存储,在查询时采用相同的 Hash 函数可实现信息的快速查询.文献[74]提出的基于环结构的存储方法,同样利用 Hash 函数将观测到的事件信息保存在信息存储节点周围的一个环结构上,从环上的节点查询信息可以避免存储节点周围出现访问热区.文献[75]提出了一种基于 Landmark 节点的存储方法.该方法从网络选择一部分节点作为 Landmark 节点,并按照 Landmark 节点的数量将整个网络划分成若干子区域.当某一子区域发生事件后,事件信息被传输到该子区域对应的 Landmark 节点,同时在传输经过的子区域对应的 Landmark 节点上保留副本.信息查询时,可以从事件传输路径上存储信息的 Landmark 节点快速获取查询结果.

随着物联网应用的深入和网络规模的不断扩大,海量网络数据的存储、传输和处理面临严峻的挑战.虽然现有研究工作提出了一些以数据为中心的数据组织和存储方法,并在一些较小规模的无线传感器网络上得到了应用,但对于大规模物联网应用,这些理论和方法还缺乏实践的检验.

3.4 用户与内容的信息交互

用户与内容的信息交互是指用户根据数据在网络中的存储组织和分布特性,通过信息查询、模式匹配和数据挖掘等方法,从网络获取用户感兴趣的信息.通常用户感兴趣的信息或者是节点的感知数据,或者是网络状态及特定事件等高层语义信息.感知数据的获取主要涉及针对网络数据的查询技术,而高层信息的获取往往涉及事件检测和模式匹配等技术.

信息查询是用户发出查询请求,网络根据数据组织和存储结构选择相应节点执行查询任务,并将查询结果通过网络反馈给用户.信息查询的实现依赖于内容在网络中的组织和存储方式.对于外部存储方式,信息查询直接在汇聚节点执行,采用传统的

数据库技术便可实现。对于局部存储方式,一般通过洪泛的方式实现信息查询,但这种方式查询效率低下。对于以数据为中心的存储方式,需要根据内容的分布特性,并考虑信息查询的效率和能耗因素,研究和设计相应的信息查询技术。文献[76]提出了一种基于抽样技术的 Top- k 查询算法。该算法基于历史观测数据,采用线性规划方法解决 Top- k 查询问题。文献[77]同样基于历史数据,在节点动态设置阈值处理 Top- k 查询,减少了网络传输量。文献[78]提出的优化查询方法,通过提取公共子操作,使公共子操作的查询结果可以被多个查询使用,从而提高了查询效率。文献[79]提出的快速查询方法,对节点及其邻居的观测数据建模,查询时选取少量代表性节点,并利用模型估计其它节点的观测值,从而快速给出查询结果。文献[80]提出了一种基于预测模型的查询算法。该算法在查询节点利用历史数据建立预测模型,并基于此模型对查询结果进行预测,如果预测结果能满足用户要求,则将预测结果作为查询结果;否则启动实际网络查询操作。该算法可以在近似满足用户查询要求的条件下有效减少数据传输量。面向物联网应用的信息查询是全新的信息查询技术,虽然现有工作对以数据为中心的数据查询进行了研究,但这些研究工作还不够深入,进一步的研究需要根据无线感知网络的分布式特性,考虑网络的资源限制和不同的信息需求,研究新型高效的信息查询技术。

事件检测是物联网最重要的应用之一,例如森林火灾、地震、泥石流等自然灾害的预报以及井下气体超标、输油管线泄漏、桥梁结构形变等安全事件的防范。从用户的角度看,事件检测就是从网络内容提取事件信息,监测事件变化,获取重要事件的发生情况。基于阈值的事件检测方法^[81-82]试图通过在节点设定观测值的阈值来判断原子事件的发生,并通过网内数据融合方法,综合原子事件的判定结果获得对复合事件的判断。虽然基于阈值的事件检测方法实现简单,但感知节点观测值阈值的设置比较困难,复合事件的判断需要所有节点将判定结果发送到汇聚节点,并且在事件判定时没有考虑节点数据的时空相关性。为了克服阈值方法的缺点,研究者提出了非阈值的事件检测方法。非阈值的事件检测方法通常基于节点数据的时空相关性将事件描述为不同的数据模式,采用模式匹配和机器学习方法进行事件分析和检测。例如文献[83-84]分别将事件描述为数据的“Contour map”模式和符号表示模式,并采用

模式匹配方法实现事件检测。文献[85-86]则采用贝叶斯网络和模糊推理方法进行事件检测。非阈值的事件检测方法能反映网络事件信息的特征,在实际中取得了比较好的应用效果。但现有研究工作大多关注事件描述和事件的模式识别问题,对于事件检测的能效问题以及三维部署网络的事件检测^[87]问题还缺乏深入探讨。

4 研究热点

随着物联网应用的深入,物联网理论和技术研究出现了一个热潮,许多新理论和方法被引入物联网技术研究中,而新应用需求的不断出现,也带来了一些新问题。下面主要分析物联网信息感知和交互方面的几个热点问题。

4.1 新信息感知技术

信息的全面感知是物联网应用最重要的特征,虽然已经有了许多信息感知和数据处理技术,例如前面的数据收集、数据聚集和数据融合等,但面向大规模的网络应用,需要研究更高效的数据感知技术。因此,将最新的理论和方法应用到物联网信息感知方面成为了物联网技术研究的一个热点。代表性的工作有基于压缩感知(compressive sensing)理论的数据感知方法^[88]和基于低秩重构的数据感知方法^[89]。

压缩感知是近年来发展迅速的信息获取理论。根据压缩感知理论,对于可压缩的信号,即使采用远低于 Nyquist 标准的数据采样方式,仍能够精确重构原始信号^[90]。因此,将压缩感知理论应用于物联网的信息感知,有可能获得显著的数据压缩效果。文献[91]提出了一种基于压缩感知的分布式稀疏模型及重建算法,利用少量观测数据实现了对整个目标区域监测数据的重建。文献[92]同样基于压缩感知理论实现了河水监测信息的高效获取。现有研究表明,压缩感知理论在物联网信息感知方面具有很大的应用前景,但如何根据物联网信息感知和交互的特点,在考虑节点运算负担、网络能耗平衡和信道噪声等因素的情况下建立压缩感知模型,包括观测矩阵的设计、稀疏基的构造和高效的优化算法等,是需要深入研究和探索的问题。

从信号稀疏表示的角度看,低秩矩阵填充理论是压缩感知理论的扩展,即对于具有低秩特性的高维矩阵,可以通过某个稀疏矩阵对其精确填充或重构^[93]。由于物联网感知网络所采集的数据具有时空

相关性,如果将全部或部分节点在一时段内采集的数据看作一个高维矩阵,则该矩阵具有低秩特性。因此,通过低秩矩阵填充可以实现从少量的稀疏观测重构全局的感知数据。目前这方面已经有了初步的研究工作。例如,文献[89]采用低秩矩阵填充理论实现了无线传感器网络的数据收集。但这些工作没有考虑网络节点的位置关系和能量均衡等问题,而且对于低秩重构优化求解的分布式高效算法也缺乏探讨。

4.2 能量有效问题

由于物联网感知节点的能量有限且很难补充,而实际应用往往需要网络及节点长期稳定的工作,因此能耗问题是物联网技术应用的核心问题,也是备受关注的研究热点。关于能耗问题的研究工作可以分为3类:(1)早期感知节点的能耗问题研究。感知节点的感知模块和处理模块的能耗要远小于通信模块,而通信模块在发送、接收和空闲状态下消耗的能量要比休眠状态大很多。因此,降低节点能耗除了采用最新的低能耗硬件外,还需要设计合理的节点休眠机制。Rabaey 等人在节点设计和降低节点能耗方面做了大量研究工作^[94]。(2)面向特定应用或协议的能耗问题研究。目前大部分的研究工作属于这一类型,主要根据具体应用需求和网络协议的特点研究相应的能量有效解决方案。例如,前面的能量有效的路由协议^[64]和数据融合方法^[66]等。(3)从宏观上研究整个网络的能效平衡和网络生存期问题。无线感知网络是一种自组织网络,其网络性能和服务能力是由网络整体性能决定的。因此,必须从宏观上系统地研究能耗问题,将节点、局部区域与整体网络的能耗综合考虑,采用跨协议层优化等方法,实现最优的节能效果。目前宏观上的能耗研究工作还不多见。

对于物联网信息感知和信息交互的能耗问题,一方面要研究各种能量有效和能效平衡的数据感知方法,包括数据收集、数据聚集和数据融合等;另一方面要研究高效的信息交互方法,包括信息分发、信息管理和信息查询等。目前面向不同的信息感知和交互应用,已经有了大量的研究工作,但对于信息感知和交互的网络节能和能效平衡问题从宏观上还缺乏深入研究。

4.3 移动网络的信息交互

虽然物联网信息感知和交互在理论和应用上都取得了丰富成果,但是这些工作大多是基于静态网络的研究,即网络中的节点是静止不动的。然而随着

新应用的不断出现,这种静态网络已经难以满足许多应用需求。例如,道路上成千上万的交通工具,几亿手机用户组成的移动网络以及野生动物监测、军事目标侦查、海底信息收集等。这类应用必须采用节点移动的动态网络技术。然而节点的移动给本来受环境影响较大的无线感知网络带来了更大的不确定性,表现为网络的状态非常不稳定,网络的拓扑结构、连通性和路由会随时间动态变化。在这种情况下,原有静态网络的许多技术不能应用,虽然时延容忍网络 DTN(Delay Tolerant Networks)的研究成果可以部分解决移动动态网络的问题,但对于信息感知和交互应用还有许多问题需要深入研究,例如基于移动动态网络的数据收集、信息分发和事件检测等问题。

根据移动网络节点的移动性,可以把移动网络分为两种,一种是大部分节点静止,只有少量节点移动;另一种是网络中的大部分或全部节点都在移动。对于第一种情况目前已经开展了许多研究工作,主要是利用一些移动节点来改善静态网络的连通性,并进行数据收集。例如,文献[95]通过一些可以在传感器部署区域随机行走的 Data mule 节点,定期收集节点的感知数据,并提供交互式的信息存储转发服务。而对于存在大规模移动节点的移动网络,目前的研究工作较少。

4.4 信息交互的安全问题

随着物联网应用领域的不断拓展,感知网络获取的信息范围也越来越广,甚至涉及到政府、军事、金融等领域。由此带来的信息安全问题成为物联网应用急需解决的问题,也是目前理论研究的热点。由于网络和节点资源的限制,在 Ad hoc 网络中成熟的安全解决方案往往无法直接应用于物联网感知网络。因此,针对无线感知网络安全问题,研究者提出了许多安全解决方案,包括加密和密钥管理、安全路由协议、数据融合安全以及隐私保护和存取控制等。

在数据加密方面,考虑到网络节点计算、存储和能量的限制,大部分方法采用实现简单的密钥加密算法,例如 SPINS^[96]和 TinySec^[97]。密钥管理是数据加密的重要环节,它处理密钥的生成、分发、存储、更新及销毁等问题。除了简单的全局预置密钥方案^[97],根据无线感知网络的节点部署、网络结构和安全要求,研究者提出了许多密钥管理方法。例如,文献[98]提出的随机密钥预分布方案,在脱机的环境中生成一个比较大的密钥池,每个节点随机从密钥池中获得一部分密钥构成密钥环。网络部署后,只

要节点之间拥有一对相同的密钥就可以用此密钥构成安全通道. 为了进一步提高系统抵抗力, 文献[99]对上述方案进行了改进, 提出了 q -composite 方案, 该方案将两个节点公共密钥的个数由 1 提高到 q , 增加了网络攻击的难度.

安全路由要解决的问题是如何在节点之间、节点和汇聚节点之间安全高效地传输数据. 由于无线感知网络具有节点对等和多跳传输的特性, 如果攻击者在路由线路上设置恶意节点, 就很容易发起篡改路由、选择性转发、黑洞和蠕虫攻击. 因此, 根据无线感知网络的特性和具体应用需求, 需要研究相应的安全路由协议. 文献[100]提出的 INSENS 安全路由协议, 利用冗余路由以及认证机制来防止网络攻击.

数据融合是数据感知的重要手段, 但如果某个节点被俘将使得融合节点很难区分正常数据和恶意数据. 特别地, 对融合节点的攻击不但破坏了来自下游节点的数据, 还将影响发送到汇聚节点的数据. 因此, 在数据融合过程中必须考虑信息安全问题. 文献[101]提出了一种安全的数据融合机制, 通过数据的随机抽样和相互检验, 使得用户在节点被捕获的情况下仍然能够验证汇聚节点给出的数据是否有效.

由于节点位置等隐私信息的暴露, 特别是一些重要的路由或簇头节点信息的暴露, 会威胁到所监测目标的安全性, 因此需要研究节点有效的隐私保护和存储控制机制. 文献[102]提出了一种新的无须测距的定位协议. 该协议采用可信定位保证节点获得有效的位置信息, 以防止错误定位信息的攻击.

针对物联网信息感知和交互的信息安全问题, 研究者提出了许多安全解决方案, 但一般只是针对较小规模网络的安全应对方案, 对于存在攻击威胁的大规模网络还缺乏实践验证.

5 问题和挑战

与物联网信息全面感知和物物互联的应用目标相比, 现有的信息感知和信息交互技术还不能满足许多实际应用的需求, 因此物联网技术的广泛深入应用还面临许多问题和挑战.

5.1 多源异构信息的交互问题

物联网感知网络获得的信息具有显著的异构特征, 表现为信息感知的目标不同、感知信息的内容不同、数据采样的频率不同、数据的表示方式不同、数

据的生存周期不同等. 因此, 面向物联网信息交互应用, 需要对这些多源异构信息采用有效统一的表达形式, 并提供高层语义知识的描述方法. 实现多源异构信息的交互可以从信息形式和语义知识两个层面入手. 在信息形式上, 研究形式统一, 内容可扩展, 能适应物联网信息交互需求的表示方式, 从而实现信息的高效存储、交换、查询和共享; 在语义知识上, 通过元数据的知识学习和高层语义的统一描述, 实现信息交互的语义互操作, 从而提高信息的利用效率.

物联网由大量功能和结构差别巨大的异质网络节点构成, 在信息交互过程中, 不同网络节点的信息交互能力, 包括信息处理、传输和存储能力以及信息交互角色和需求存在极大差异, 例如一般的温湿度传感器与音视频多媒体传感器的信息处理能力和交互需求差异非常大. 因此, 在信息有效统一表达的基础上, 如何实现异质网络节点的智能交互是物联网信息交互面临的一个难点问题. 该问题实质上是不同网络节点信息交互的有效适配问题, 主要有 3 方面的适配问题: (1) 由于参与交互的网络节点具有不同的信息处理和理解能力, 因此信息交互过程面临交互对象的适配问题; (2) 由于大量网络节点带来的数据多源冗余性, 信息交互面临数据集合的优化选择问题, 既要达到信息交互的质量又要求代价最低, 因此信息交互存在效能适配问题; (3) 由于物理对象拥有者的差异, 对物联网信息的访问经常是受限的, 只有被授权的访问才是允许的, 因此信息交互也面临着权限适配问题.

5.2 大规模网络的信息交互

目前大规模无线感知网络的应用需求非常迫切, 例如在智能交通、环境监测、现代农业等领域, 无要求持续的大范围的信息感知和信息交互, 这也与物联网普遍互联和全面感知的特性相一致. 但受实际应用环境的影响和网络资源的限制, 现有的物联网无线感知网络的规模一般都比较小, 节点数目大多在几十个到几百个, 而且网络节点可以支持的感知功能也比较单一, 往往局限于有限的几种标量信息. 而现有研究工作大多针对较小规模的网络展开, 对网络的行为特性往往也做出了一些假设和限制. 对于大规模无线感知网络, 许多研究工作仅停留在理论分析和模拟仿真的层面上. 因此, 针对大规模无线感知网络应用, 需要深入研究信息感知和信息交互所涉及的能量有效、负载均衡、网络延迟和吞吐量等问题, 并通过实际网络验证理论研究的结论.

5.3 多媒体感知网络的信息交互

目前大部分无线感知网络获取监测目标的标量数据,例如环境监测的温度、湿度、光强等,这种标量数据提供的信息含量较少,应用灵活性差,限制了系统的监测能力。而多媒体感知网络采集环境的视频、声音、图像等信息,通过自然直观、内容丰富的视听媒体实现更为准确全面的信息感知。但复杂高维的多媒体信息对感知网络的数据传输、处理和存储以及能量供给提出了全新的挑战。因此,对于多媒体感知网络应用,首先要研究能承载海量多媒体信息的新网络系统及其网络技术,包括多媒体网络节点的软硬件设计、网络覆盖控制、网络拓扑组织、网络路由维护、高效可靠的数据传输、媒体信息安全等;其次,需要研究多媒体网络有效的信息处理技术。针对分辨率、编码格式、帧率等差异很大的多媒体信息,研究数据存储、数据压缩、数据融合、特征提取和对象识别等多种信息智能处理技术;最后,需要研究和解决多媒体感知网络的信息交互问题。与传统的网络视频监控不同,视频感知网络不是将采集的数据传输到数据中心集中处理,而是采用复杂的分布式网内处理技术,通过节点间的协同完成信息交互。因此,多媒体感知网络的信息交互是多媒体信息分布式协同处理的新课题。目前这方面的研究才刚刚起步,有大量的技术难题亟待解决。例如,多源异构多媒体信息的同步、异质网络节点的交互协同、基于多媒体信息的分布式事件检测等问题。

6 总 结

物联网信息感知和交互涉及到多方面的研究内容,包括感知节点的软硬件设计、无线感知网络的组网技术、数据的采集处理技术、网内数据智能处理技术、信息管理和存储以及信息查询等。本文重点分析了数据收集、清洗、压缩、聚集和融合等主要的信息感知技术,并提出了物联网信息交互的基本模型,在此基础上对信息交互涉及的相关技术进行了详细分析。实际应用需求的不断增长和扩展,推动了物联网理论和技术研究的不断深入,一些新的信息感知方法和信息交互问题引起了研究者的广泛关注,文章讨论了其中的几个热点问题,包括基于压缩感知的信息感知方法、能量有效、移动网络和信息安全等问题。展望物联网的发展,信息感知和信息交互在多源异构信息的交互、大规模网络应用以及多媒体感知网络等多个方面还存在巨大挑战。

参 考 文 献

- [1] Deepak G, Ramesh G, Scott S, Deborah E. Highly-resilient, energy-efficient multipath routing in wireless sensor networks. *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, 2001, 5(4): 10-24
- [2] Wan C, Campbell A, Krishnamurthy L. Pump slowly, fetch quickly (PSFQ): A reliable transport protocol for sensor networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2005, 23(4): 862-872
- [3] Pister K S J, Doherty L. Time synchronized mesh protocol// *Proceedings of the 2008 IASTED International Symposium on Distributed Sensor Networks (DSN'08)*. Orlando, USA, 2008: 391-398
- [4] Xu N, Rangwala S, Chintalapudi K K, Ganesan D, Broad A, Govindan R, Estrin D. A wireless sensor network for structural monitoring// *Proceedings of the 2nd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys'04)*. Baltimore, USA, 2004: 13-24
- [5] Lu G, Krishnamachari B, Raghavendra C S. An adaptive energy-efficient and low-latency MAC for data gathering in wireless sensor networks// *Proceedings of the 18th International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS'04)*. Santa Fe, USA, 2004: 224-232
- [6] Song W Z, Yuan F, LaHusen R. Time-optimum packet scheduling for many-to-one routing in wireless sensor networks. *International Journal of Parallel, Emergent and Distributed Systems*, 2007, 22(5): 355-570
- [7] Paradis L, Han Q. TIGRA: Timely sensor data collection using distributed graph coloring// *Proceedings of the 6th IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom'08)*. Hong Kong, China, 2008: 264-268
- [8] Ahn G S, Miluzzo E, Campbell A T, Hong S G, Cuomo F. Funneling-MAC: A localized sink-oriented MAC for boosting fidelity in sensor networks// *Proceedings of the 4th International Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys'06)*. Boulder, USA, 2006: 293-306
- [9] Ee C T, Bajcsy R. Congestion control and fairness for many-to-one routing in sensor networks// *Proceedings of the 2nd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys'04)*. Baltimore, USA, 2004: 148-161
- [10] Wu W, Cheng X, Ding M, Xing K, Liu F, Deng P. Localized outlying and boundary data detection in sensor networks. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 2007, 19(8): 1145-1157
- [11] Bettencourt L A, Hagberg A, Larkey L. Separating the wheat from the chaff: Practical anomaly detection schemes in ecological applications of distributed sensor networks// *Proceedings of the 3rd IEEE International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS'07)*. Santa Fe, USA, 2007: 223-239
- [12] Jun M C, Jeong H, Jay Kuo C C. Distributed spatio-temporal outlier detection in sensor networks// *Proceedings of the SPIE*. Baltimore, USA, 2005, 5819: 273-284

- [13] Sheng B, Li Q, Mao W, Jin W. Outlier detection in sensor networks//Proceedings of the 8th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc'07). Montreal, Canada, 2007; 219-229
- [14] Palpanas T, Papadopoulos D, Kalogeraki V, Gunopulos D. Distributed deviation detection in sensor networks. ACM Special Interest Group on Management of Data, 2003, 32(4); 77-82
- [15] Branch J, Szymanski B, Giannella C, Wolff R. In-network outlier detection in wireless sensor networks//Proceedings of the 26th IEEE International Conference on Distributed Computing Systems(ICDCS'06). Lisbon, Portugal, 2006; 51-59
- [16] Zhang K, Shi S, Gao H, Li J. Unsupervised outlier detection in sensor networks using aggregation tree//Proceedings of the 3rd International Conference on Advanced Data Mining and Applications(ADMA'07). Harbin, China, 2007; 158-169
- [17] Rajasegarar S, Leckie C, Palaniswami M, Bezdek J C. Distributed anomaly detection in wireless sensor networks//Proceedings of the 10th IEEE Singapore International Conference on Communication systems(ICCS'06). Singapore, 2006; 1-5
- [18] Rajasegarar S, Leckie C, Palaniswami M, Bezdek J C. Quarter sphere based distributed anomaly detection in wireless sensor networks//Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Communications(ICC'07). Glasgow, Scotland, 2007; 3864-3869
- [19] Hill D J, Minsker B S, Amir E. Real-time Bayesian anomaly detection for environmental sensor data//Proceedings of the 32nd Congress of the International Association of Hydraulic Engineering and Research(IAHR'07). Venice, Italy, 2007; 1-10
- [20] Pan Li-Qiang, Li Jian-Zhong, Luo Ji-Zhou. A temporal and spatial correlation based missing values imputation algorithm in wireless sensor networks. Chinese Journal of Computers, 2010, 33(1); 1-10(in Chinese)
(潘立强, 李建中, 骆吉洲. 传感器网络中一种基于时-空相关性的缺失值估计算法. 计算机学报, 2010, 33(1); 1-10)
- [21] Pan L, Li J. K-Nearest neighbor based missing data estimation algorithm in wireless sensor networks. Wireless Sensor Network, 2010, 2(2); 115-122
- [22] Petrovic D, Shah R C, Ramchandran K. Data funneling: Routing with aggregation and compression for wireless sensor networks//Proceedings of the 1st IEEE International Workshop on Sensor Network Protocols and Applications(SNPA'03). Seattle, USA, 2003; 156-162
- [23] Arici T, Gedik B, Altunbasak Y. PINCO: A pipelined in network compression scheme for data collection in wireless sensor networks//Proceedings of the 12th International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN'03). Dallas, USA, 2003; 539-544
- [24] Deligiannakis A, Kotidis Y, Roussopoulos N. Compressing historical information in sensor networks//Proceedings of the 2004 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data(SIGMOD'04). Paris, France, 2004; 527-538
- [25] Lin S, GunoPulos D, Kalogeraki V. A data compression technique for sensor networks with dynamic bandwidth allocation//Proceedings of the 12th International Symposium on Temporal Representation and Reasoning (TIME'05). Burlington, USA, 2005; 186-188
- [26] Xu N, Rangwala S, Chintalapudi K K. A wireless sensor network for structural monitoring//Proceedings of the 2nd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems(SenSys'04). Baltimore, USA, 2004; 13-24
- [27] Ganesan D, Estrin D, Heidemann J. DIMENSIONS: Why do we need a new data handling architecture for sensor networks?. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2003, 33(1); 143-148
- [28] Ciancio A, Ortega A. A dynamic programming approach to distortion-energy optimization for distributed wavelet compression with applications to data gathering in wireless sensor networks//Proceedings of the 31st International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing(ICASSP'06). Toulouse, France, 2006; 949-952
- [29] Wagner R S, Baraniuk R G, Du S, David B J, Albert C. An architecture for distributed wavelet analysis and processing in sensor networks//Proceedings of the 5th International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN'06). Nashville, USA, 2006; 243-250
- [30] Yao Y, Gehrke J. The cougar approach to in-network query processing in sensor networks. ACM SIGMOD Record, 2002, 31(3); 9-18
- [31] Madden S R, Szewczyk R, Franklin M J. Supporting aggregate queries over ad hoc wireless sensor networks//Proceedings of the 4th IEEE Workshop on Mobile Computing and Systems Applications. New York, USA, 2002; 49-58
- [32] Zhao J, Govindan R. Computing aggregates for monitoring wireless sensor networks//Proceedings of the 1st IEEE International Workshop Sensor Network Protocols and Applications. Anchorage, USA, 2003; 37-48
- [33] Przydatek B, Song D, Perrig A. SIA: Secure information aggregation in sensor networks//Proceedings of the 1st International Conference on Embedded Networked Systems (SenSys'03). Los Angeles, USA, 2003; 255-265
- [34] Shrivastava N, Buragohain C, Agrawal D et al. Medians and beyond: New aggregation techniques for sensor networks//Proceedings of the 2nd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys'04). Baltimore, USA, 2004; 23-24
- [35] Nakamura E F, Loureiro A A F, Frery A C. Information fusion for wireless sensor networks: Methods, models, and classifications. ACM Computer Survey, 2007, 39(3); A9/1-A9/55
- [36] Xiao J, Ribeiro A, Luo Z, Giannakis G B. Distributed compression-estimation using wireless sensor networks. IEEE Signal Proceedings Magazine, 2006, 23(4); 27-41
- [37] Yuan Y, Kam M. Distributed decision fusion with a random-access channel for sensor network applications. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2004, 53(4); 1339-1344
- [38] Shah S F A, Ribeiro A, Giannakis G B. Bandwidth-constrained MAP estimation for wireless sensor networks//Proceedings of the 39th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers. Pacific Grove, USA, 2005; 215-219

- [39] Guestrin C, Bodik P, Thibaux R, Pasking M, Madden S. Distributed regression: An efficient framework for modeling sensor network data//Proceedings of the 3rd International Symposium on Information Processing in Sensor Networks (IPSN'04). Berkeley, USA, 2004; 1-10
- [40] Willett R, Martin A, Nowak R. Backcasting: Adaptive sampling for sensor networks//Proceedings of the 3rd International Symposium on Information Processing in Sensor Networks (IPSN'04). Berkeley, USA, 2004; 124-133
- [41] Jin G, Nittel S. NED: An efficient noise-tolerant event and event boundary detection algorithm in wireless sensor networks//Proceedings of the 7th International Conference on Mobile Data Management (MDM'06). Nara, Japan, 2006; 153-161
- [42] Jain A, Chang E, Wang Y. Adaptive stream resource management using Kalman filters//Proceedings of the 2004 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data (SIGMOD'04). Paris, France, 2004; 11-22
- [43] Mascolo C, Musolesi M. SCAR: Context-aware adaptive routing in delay tolerant mobile sensor networks//Proceedings of the 2006 International Conference on Communications and Mobile Computing (ICCMC'06). Vancouver, Canada, 2006; 533-538
- [44] Raviraj P, Sharif H, Hempel M, Ci S. MOBMAC: An energy efficient and low latency MAC for mobile wireless sensor networks//Proceedings of the 2005 Systems Communications. Montreal, Canada, 2005; 370-375
- [45] Aslam J, Butler Z, Constantin F, Crespi V, Cybenko G, Rus D. Tracking a moving object with a binary sensor network//Proceedings of the 1st International Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys'03). Los Angeles, USA, 2003; 150-161
- [46] Nakamura E F, Figueiredo C M, Loureiro A A. Information fusion for data dissemination in self-organizing wireless sensor networks//Proceedings of the 4th International Conference on Networking (ICN2005). Reunion, France, 2005; 585-593
- [47] Shu H, Liang Q. Fuzzy optimization for distributed sensor deployment//Proceedings of the 2005 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC'05). New Orleans, USA, 2005; 1903-1908
- [48] Gupta I, Riordan D, Sampall S. Cluster-head election using fuzzy logic for wireless sensor networks//Proceedings of the 3rd Annual Communication Networks and Services Research Conference (CNSR'05). Halifax, Canada, 2005; 255-260
- [49] Yusuf M, Haider T. Energy-aware fuzzy routing for wireless sensor networks//Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Emerging Technologies (ICET'05). Islamabad, Pakistan, 2005; 63-69
- [50] Wallace J, Pesch D, Rea S, Irvine J. Fuzzy logic optimization of MAC parameters and sleeping duty-cycles in wireless sensor networks//Proceedings of the 62nd Vehicular Technology Conference. Dallas, USA, 2005; 1824-1828
- [51] Filillidis A, Jain L C, Martin N. Fusion of intelligent agents for the detection of aircraft in SAR images. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2000, 22(4); 378-384
- [52] Friedlander D S, Phooha S. Semantic information fusion for coordinated signal processing in mobile sensor networks. International Journal of High Performance Computing Applications. 2002, 16(3); 235-241
- [53] Zhang W, Cao G. DCTC: Dynamic convoy tree based collaboration for target tracking in sensor networks. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2004, 3(5); 1689-1701
- [54] Heinzelman W R, Chandrakasan A, Balakrishnan H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks//Proceedings of the 2000 Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS'00). Maui, USA, 2000; 3005-3014
- [55] Lindsey S, Raghavendra C S. PEGASIS: Power efficient gathering in sensor information systems//Proceedings of the IEEE Aerospace Conference. Big Sky, Montana, USA, 2002; 1125-1130
- [56] Tan H, Korpeoglu I. Power efficient data gathering and aggregation in wireless sensor networks. ACM SIGMOD Record, 2003, 32(4); 66-71
- [57] Toms E G. Information interaction: Providing a framework for information architecture. Journal of the American Society for Information Science and Technology. 2002, 53(10); 855-862
- [58] Guo X. Broadcasting for network lifetime maximization in wireless sensor networks//Proceedings of the 1st Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks (SECON'04). Santa Clara, USA, 2004; 352-358
- [59] Stann F, Heidemann J, Shroff R, Murtaza M Z. RBP: Robust broadcast propagation in wireless networks//Proceedings of the 4th International Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys'06). Boulder, USA, 2006; 85-98
- [60] Kyasanur P, Choudhury R R, Gupta I. Smart Gossip: An adaptive gossip-based broadcasting service for sensor networks//Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems. Vancouver, Canada, 2006; 91-100
- [61] Lewis P, Patel N, Culler D, Shenker S. Trickle: A self-regulating algorithm for code propagation and maintenance in wireless sensor networks//Proceedings of the 1st Symposium on Networked Systems Design and Implementation (NSDI'04). San Francisco, USA, 2004; 15-28
- [62] Wang F, Liu J. RBS: A reliable broadcast service for large-scale low duty-cycled wireless sensor networks//Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Communications (ICC'08). Beijing, China, 2008; 2416-2420
- [63] Byers J, Nasser G. Utility-based decision-making in wireless sensor networks//Proceedings of the 1st ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking & Computing. Boston, USA, 2000; 143-144
- [64] Bian F, Kempe D, Govindan R. Utility-based sensor selection//Proceedings of the 5th International Conference on Information Processing in Sensor Network. Nashville, USA, 2006; 11-18

- [65] Liu Yu, Wang Yu-Mei, Zhang Lin. An information-driven sensor selection algorithm for target estimation in sensor networks. *Journal of Beijing University of Posts and Telecommunication*, 2006, 29(6): 62-66 (in Chinese)
(刘雨, 望育梅, 张琳. 一种无线传感器网络中的信息驱动节点选择机制. *北京邮电大学学报*, 2006, 29(6): 62-66)
- [66] Yan Zhen-Ya, Zheng Bao-Yu. Sensor selection algorithm based on reputation in wireless sensor network. *Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications*, 2008, 28(2): 11-13 (in Chinese)
(颜振亚, 郑宝玉. 无线传感器网络中可信的节点选择算法. *南京邮电大学学报*, 2008, 28(2): 11-13)
- [67] Tian D, Georganas N D. A coverage-preserving node scheduling scheme for large wireless sensor networks//*Proceedings of the 1st ACM Workshop on Wireless Sensor Network and Applications*. Atlanta, USA, 2002: 32-41
- [68] Perillo M A, Heinzeiman W B. Optimal sensor management under energy and reliability constraints//*Proceedings of the 2003 IEEE Conference on Wireless Communications and Networking (WCNC'03)*. New Orleans, USA, 2003: 1621-1626
- [69] Chen H, Wu H, Tzeng N F. Grid-based approach for working node selection in wireless sensor networks//*Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Communications (ICC'04)*. Paris, France, 2004: 3673-3678
- [70] Xing G, Wang X, Zhang Y, Lu C, Robert P, Gill C. Integrated coverage and connectivity configuration for energy conservation in sensor networks. *ACM Transactions on Sensor Networks*, 2005, 1(1): 36-72
- [71] Cardei M, Du D Z. Improving wireless sensor network lifetime through power aware organization. *Wireless Networks*, 2005, 11(3): 58-63
- [72] Bravos G N, Kanas A G. Energy efficiency of MIMO-based sensor networks with a cooperative node selection algorithm//*Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Communications (ICC'07)*. Glasgow, Scotland, 2007: 3218-3223
- [73] Sylvia R, Brad K, Scott S, Deborah E, Ramesh G, Li Y, Fang Y. Data-Centric storage in sensornets with GHT, a geographic hash table. *Mobile Networks and Applications*, 2003, 8(4): 427-442
- [74] Zhang W, Cao G, Tom L P. Data dissemination with ring-based index for wireless sensor networks//*Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Network Protocols*. Washington, USA, 2003: 305-314
- [75] Fang Q, Gao J, Guibas L J. Landmark-based information storage and retrieval in sensor networks//*Proceedings of the 25th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM'06)*. Barcelona, Spain, 2006: 1-12
- [76] Silberstein A, Braynard R, Ellis C S, Munagala K, Yang J. A sampling-based approach to optimizing Top- k queries in sensor networks//*Proceedings of the 22nd International Conference on Data Engineering (ICDE'06)*. Atlanta, USA, 2006: 68-80
- [77] Wu M, Xu J, Tang X, Lee W C. Top- k monitoring in wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 2007, 19(7): 962-976
- [78] Xiang S, Lim H B, Tan K L, Zhou Y. Two-tier multiple query optimization for sensor networks//*Proceedings of the 27th IEEE International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS'07)*. Toronto, Canada, 2007: 39-48
- [79] Kotidis Y. Snapshot Queries: Towards data-centric sensor networks//*Proceedings of the 21st International Conference on Data Engineering (ICDE'05)*. Tokyo, Japan, 2005: 131-142
- [80] Deshpande A, Guestrin C, Madden S, Joseph M H, Wei H. Model-driven data acquisition in sensor networks//*Proceedings of the 30th International Conference on Very Large Data Bases (VLDB'04)*. Toronto, Canada, 2004: 588-599
- [81] Hellerstein J M, Hong W, Madden S, Stanek K. Beyond average: Toward sophisticated sensing with queries//*Proceedings of the 2nd IEEE/ACM International Workshop Information Processing in Sensor Networks (IPSN'03)*. Palo Alto, USA, 2003: 63-79
- [82] Madden S R, Franklin M J, Hellerstein J M, Hong W. TinyDB: An acquisitional query processing system for sensor networks. *ACM Transactions on Database System*, 2005, 30(1): 122-173
- [83] Xue W, Luo Q, Chen L, Liu Y. Contour map matching for event detection in sensor networks//*Proceedings of the 2006 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data (SIGMOD'06)*. Chicago, USA, 2006: 145-156
- [84] Zouboulakis M, Roussos G. Escalation: Complex event detection in wireless sensor networks//*Proceedings of the 2nd European Conference on Smart Sensing and Context (EuroSSC'07)*. Kendal, England, 2007: 270-285
- [85] Bahrepour M, Meratnia N, Havinga P J M. Sensor fusion-based event detection in wireless sensor networks//*Proceedings of the 3rd International Workshop on Information Fusion and Dissemination in Wireless Sensor Networks*. Toronto, Canada, 2009: 1-8
- [86] Marinperianu M, Havinga P J M. D-FLER: A distributed fuzzy logic engine for rule-based wireless sensor networks//*Proceedings of the 4th International Symposium on Ubiquitous Computing Systems (UCS'07)*. Tokyo, Japan, 2007: 86-101
- [87] Li M, Liu Y, Chen L. Nonthreshold-based event detection for 3D environment monitoring in sensor networks. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 2008, 20(12): 1699-1711
- [88] Luo C, Wu F, Sun J, Chen C. Compressive data gathering for large-scale wireless sensor networks//*Proceedings of the 15th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'09)*. Beijing, China, 2009: 145-156
- [89] Cheng J, Jiang H, Ma X, Liu L, Qian L, Tian C, Liu W. Efficient data collection with sampling in WSNs: Making use of matrix completion techniques//*Proceedings of the IEEE Global Communications Conference Exhibition (GlobeCom'10)*. Miami, USA, 2010: 1-5

- [90] Candes E J, Wakin M B. An introduction to compressive sampling. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2008, 25(2): 21-30
- [91] Hormati A, Vetterli M. Distributed compressed sensing: Sparsity models and reconstruction algorithms using annihilating filter//*Proceedings of the 33rd IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP'08)*. Las Vegas, USA, 2008: 5141-5144
- [92] Haupt J, Bajwa W U, Rabbat M, Nowak R. Compressed sensing for networked data. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2008, 25(2): 92-101
- [93] Recht B, Fazel M, Parrilo P A. Guaranteed minimum-rank Solutions of linear matrix equations via nuclear norm minimization. *SIAM Review*, 2010, 52(3): 471-501
- [94] Pedram Massoud, Rabaey Jan M. *Power Aware Design Methodologies*. London, UK: Springer, 2002
- [95] Shah R C, Roy S, Jain S, Brunette W. Data MULEs: Modeling and analysis of a three-tier architecture for sparse sensor networks. *Ad Hoc Networks Journal*, 2003, 1(2): 215-233
- [96] Perrig A, Szewczyk R, Tygar J D, Wen V, David E. SPINS: Security protocols for sensor networks. *Wireless Networks Journal*, 2002, 8(5): 521-534
- [97] Karlof C, Sastry N, Wagner D. TinySec: A link layer security architecture for wireless sensor networks//*Proceedings of the 2nd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys'04)*. Baltimore, USA, 2004: 162-175
- [98] Eschenauer L, Gligor V D. A key-management scheme for distributed sensor networks//*Proceedings of the ACM Conference on Computer and Communications Security (CCS'02)*. Washington, DC, USA, 2002: 41-47
- [99] Chan H, Perrig A, Song D X. Random key predistribution schemes for sensor networks//*Proceedings of the 2003 IEEE Symposium on Security and Privacy*. Washington, USA, 2003: 197-213
- [100] Deng J, Han R, Mishra S. INSENS: Intrusion-tolerant routing in wireless sensor networks. *Computer Communications*, 2006, 29(2): 216-230
- [101] Przydatek B, Song D, Perrig A. SIA: Secure information aggregation in sensor networks//*Proceedings of the 1st International Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys'03)*. Los Angeles, USA, 2003: 255-265
- [102] Lazos L, Poovendran R. SeRLoc: Secure range independent localization for wireless sensor networks//*Proceedings of the 3rd ACM Workshop on Wireless Security (WISE'04)*. Philadelphia, USA, 2004: 21-30



HU Yong-Li, born in 1973, Ph. D., associate professor. His research interests include information processing of Internet of Things, pattern recognition and multimedia technology.

SUN Yan-Feng, born in 1964, Ph. D., professor, Ph. D. supervisor. Her main research interests include multi-functional perception, pattern recognition and image process.

YIN Bao-Cai, born in 1963, Ph. D., professor, Ph. D. supervisor. His research interests include multi-functional perception, multimedia technology, virtual reality and computer graphics.

Background

Information sensing technology is the basic function of Internet of Things (IoT), by which the applications of IoT obtain the raw data from environments or in-network processed information. For IoT application, the goal of "Thing-to-Thing Interconnection" is information interaction. So information sensing and interaction has become the active research points in IoT. As much research results have been gained in this area recently, we study the state-of-the-art of information sensing and interaction technology in IoT. We present the main information sensing methods, including data cleaning, collection, aggregation, compression and fusion. An information interaction model is proposed in this paper. Based on the model, the information interaction techniques are discussed in detail. To highlight the hot topics about in-

formation sensing and interaction, some problems are addressed, such as new sensing techniques, energy efficiency, security and mobile sensing network. For the future application of IoT, several challenges of the sensing and interaction technology are discussed. This paper is partly supported by the National Basic Research Program (973 Program) of China (2011CB302703) and the National Natural Science Foundation of China (Nos. 61171169, 61133003, 60825203, 60973057). These projects focus on the data processing and information interaction in IoT. Our group has been working on the in-network data processing methods and the data gathering based on the compressive sensing theory. Some research results have been accepted by INFOCOM'12 or other conferences and international journals.