

无线传感器网络管理技术

赵忠华^{1,2,3} 皇甫伟¹ 孙利民¹ 杜腾飞⁴

(中国科学院软件研究所 北京 100190)¹(信息安全国家重点实验室 北京 100049)²

(中国科学院研究生院 北京 100049)³ (北京大学软件与微电子学院 北京 100871)⁴

摘要 无线传感器网络是一个资源受限、应用相关的任务型网络,与现有的计算机网络有显著差异。现有的网络管理不再适用于无线传感器网络,面临着诸多新的挑战。首先简要介绍了无线传感器网络管理的技术背景,并结合无线传感器网络自身的特点,给出了相应的无线传感器网络的管理技术应具备的特征等。然后提出了一个通用的无线传感器网络管理框架,并对其中的各管理内容及研究进展进行了详细论述。最后探讨了无线传感器网络管理领域面临的公开难题,并针对目前发展现状提出了今后的研究方向。

关键词 无线传感器网络,网络管理,管理技术

中图分类号 TP311 文献标识码 A

Wireless Sensor Network Management Technology

ZHAO Zhong-hua^{1,2,3} HUANGFU Wei¹ SUN Li-min¹ DU Teng-fei⁴

(Institute of Software, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)¹

(State Key Laboratory of Information Security, Institute of Software, CAS, Beijing 100049, China)²

(Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)³

(School of Software and Microelectronics, Beijing University, Beijing 100871, China)⁴

Abstract Wireless sensor networks are resource-constrained and application-related. Wireless sensor networks are different from other traditional computer networks, so the traditional network management is no longer applied to wireless sensor networks and wireless sensor network management is faced with many challenges. This paper briefly described the technology background of the wireless sensor network management; gave the corresponding management characteristics in wireless sensor networks with the characteristics of wireless sensor network itself; then put forward a common framework of wireless sensor network management and discussed the contents of the various management and research progress in detail; finally, we discussed the public challenges facing the wireless sensor network management and pointed out the future research directions.

Keywords Wireless sensor networks, Network management, Management technology

无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSN, 简称传感器网络)由大量低成本的微型传感器节点组成,协作地实现所部署区域的感知信息收集、处理和传输任务,可广泛应用于安全反恐、智能交通、医疗救护、环境监测、精准农业和工业自动化等诸多领域,受到了工业界和学术界的普遍重视,近年来不仅取得了大量的科研成果,也得到了一定的实际应用。

传感器网络管理技术是保障无线传感器网络灵活、有效、可靠和安全地满足系统设计目标的支撑技术。网络管理对于传感器网络具有重要的意义,是无线传感器网络大规模实用化的关键技术之一。

与传统的计算机网络相比,无线传感器网络具有应用相关、资源受限、大规模部署、高度动态性等特点。由于无线传感器网络与传统的计算机网络之间存在着显著的差异,一方

面现有的网络管理技术难以适用于无线传感器网络,另一方面传感器网络的自身特点也对其管理技术提出了诸多挑战。

目前,对无线传感器网络管理的理论和技术的研究已经取得了较为丰富的研究成果。本文综述传感器网络管理的体系框架和关键技术,分析和对比现有的研究成果,给出其进一步的研究方向。

本文第2节提出我们的无线传感器网络管理的内容及进展;第3节介绍无线传感器网络管理的公开问题和下一步的发展方向;最后总结全文。

1 无线传感器网络管理

与传统的计算机网络相比,无线传感器网络具有应用相关、资源受限、大规模部署、高度动态性等特点,因此传感器网

到稿日期:2010-03-03 返修日期:2010-06-17 本文受国家自然科学基金(60873241),国家重大专项(2009ZX03006-001-01),北京市自然科学基金(4092011)和中国科学院专项(KGCX2-YW-149)资助。

赵忠华(1983—),男,博士生,CCF会员,主要研究方向为无线传感器网络管理,E-mail:zhaozhonghua@is.iscas.ac.cn;皇甫伟(1975—),男,博士,助理研究员,主要研究方向为无线网络、自组织网络和无线传感器网络;孙利民(1966—),男,博士,研究员,主要研究方向为无线传感器网络和多媒体通信技术。

络的管理技术也相应地具有自身的显著特征,具体表现在以下方面。

1) 轻量级特征:无线传感器网络资源极度受限,主要表现在电源能量有限、通信能力有限、计算和存储能力有限。节点由电池供电,通常在使用过程中难以对电池充电或更换电池,一旦电池能量用完,节点将无法工作;由于传感节点体积小,成本低廉,受到价格、体积和功耗的限制,其计算能力、程序空间和内存空间比通常的计算机功能要弱很多。上述特点决定了传感器网络的管理技术必须具备轻量级的特征,以降低在能量、计算、通信等方面的消耗。

2) 开放性特征:传感器网络与现有的计算机网络相比,不仅其硬件平台、操作系统和通信协议更为复杂多样,而且传感器网络的应用场景、用户需求和任务目标也有显著的差异。此外,还必须考虑传感器网络和现有的互联网、蜂窝网的多种互联互通技术。传感器的应用差异和节点异构特点要求传感器网络的管理技术具有灵活的扩展能力,提供开放的通用接口。

3) 自治特征:在传感器网络应用中,节点通常情况下被随机部署在没有基础网络设施的场所,用户难以对节点进行人工的管理和维护,必须由传感器节点自身形成分布式自适应的多跳网络结构,使其具备一定程度的智能决策能力,在无需人工参与的情况下保障网络的可靠运行。

4) 鲁棒性特征:无线传感器网络通常工作于恶劣的野外环境,价格低廉的节点容易发生故障甚至损坏,无线通信易受干扰,网络拓扑也因节点失效和链路不稳定等因素而动态变化。无线传感器网络管理技术必须容忍网络中的各种故障情况,为用户提供可靠的感知服务。

5) 可伸缩性特征:未来大规模的无线传感器网络可以覆盖广阔的监测区域,包含着数以千计的传感节点,感知数据量非常巨大。无线传感器网络的上述特点要求其管理技术具有良好的可伸缩性。

国际标准化组织(ISO)在开放式通信系统互联参考模型的网络管理标准中定义的网络管理的5大功能分别为:配置管理、性能管理、故障管理、安全管理和计费管理。

无线传感器网络本身的研究仍尚属于初期,对尚处于研究阶段的无线传感器网络管理没有统一的定义。根据文献[1],无线传感器网络管理的定义为:在动态、不确定环境中,为了实现特定的任务目标,对分布的传感器节点进行管理和协调,以优化的资源使用来提高感知性能的系统或过程。“管理”意味着对传感器节点进行控制,“协调”带来资源的有效利用。

参考国际标准化组织定义的网络管理功能,结合传感器网络的自身特点,我们提出如图1所示的一个无线传感器网络管理功能框架。

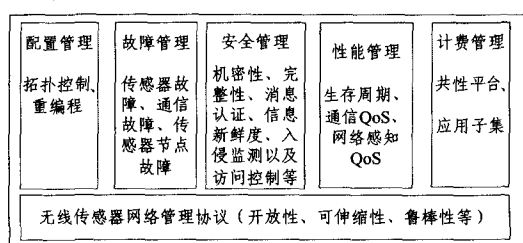


图1 无线传感器网络管理功能框架

在图1中,无线传感器网络管理功能框架包括无线传感器网络管理协议和5个管理功能,分别是配置管理、故障管理、安全管理、性能管理和计费管理。

下面对上述无线传感器网络管理框架的各管理内容及最新研究进展进行详细论述。

2 无线传感器网络管理框架

2.1 无线传感器网络管理框架

典型的无线传感器网络管理框架包括 BOSS^[2] 和 MANNA^[3]。BOSS 可看作 UPnP 网络和传感器节点之间的仲裁者,MANNA 则为基于策略的传感器网络管理提供了统一的框架。

BOSS^[2] 是一种基于 UPnP 协议的无线传感器网络管理系统。BOSS 通过在 UPnP 控制点和 WSN 之间建立桥接架构来使得资源有限的 WSN 能接入 UPnP 网络,同时这种架构也让用户可以通过多种 UPnP 控制点对 WSN 进行管理,从而大大提高了 WSN 的易用性。BOSS 系统主要由 UPnP 控制点、BOSS 和 WSN 设备组成。控制点通过 BOSS 提供的服务对 WSN 进行控制和管理,BOSS 也是一个 UPnP 设备,并且有充足的资源运行 UPnP 协议。控制点和 BOSS 之间使用 UPnP 协议进行通信,而 WSN 和 BOSS 之间使用私有协议通信。控制点通过 BOSS 从 WSN 中收集基本的网络管理信息,如节点设备描述、节点数量和网络拓扑等,对这些信息进行分析处理之后,控制点再通过 BOSS 进行诸如同步、定位和能量管理等基本管理服务。

MANNA^[3] 的设计思想是将网络管理与网络应用分离,也就是说网络管理系统能适应不同的应用环境。MANNA 的组成要素包括管理服务、管理功能和网络模型。管理功能是执行动作,网络模型定义了执行条件,而管理服务则将它们有机结合起来。这样,就不必为每一种应用定义新的管理方案,而可以在网络部署前考虑好应用可能会涉及到的所有情况,统一制定相应的网络模型和管理功能。当网络发生变化时,对相应的网络模型和管理功能进行修改或增删,就可以继续提供管理服务了。MANNA 参考了现有的策略语言构建相关的网络模型和管理功能。MANNA 将 WSN 网络管理中的角色分为 Manager, Agent 和 MIB。功能架构定义了这些角色的功能和位置。MANNA 详细定义了这些网络结构、网络流量类型和网络管理角色的各种组合,以适应不同网络应用环境需求。MANNA 还提出了“域”的概念,域是对簇的抽象和提升,它方便了对网络架构的描述。MANNA 的信息架构定义了 WSN 的信息模型,它将信息分为两类:静态信息和动态信息。MANNA 吸收了传统网络管理的思想,又充分考虑了无线传感器网络的特点,集多种管理结构和技术于一体。虽然 MANNA 并未完成所有细节,但它是第一个被完整提出并论述的无线传感器网络管理架构,对无线传感器网络管理的研究产生了非常大的影响。

2.2 无线传感器网络管理协议

一些研究者对无线传感器网络管理设计了系列协议。例如在 sNMP 中用于提取网络拓扑的 TopDisc^[4] 和 STREAM^[5]、RRP^[6] 使用的区域泛洪协议、SNMS^[7] 中引进的 Drip 协议、WinMS^[8] 基于的 FlexiMAC 协议。

RRP 管理架构^[6] 将商业中的供应链管理策略应用到

WSN 管理中,特别针对需要进行连续数据采集的应用场景(如战场和生态监测)。仿照供应链策略,RRP 将无线传感器网络分为 3 个功能区:生产区、运输区以及仓储和服务区。各个区节点的角色和任务各不相同。生产区有两种节点:产生原始传感数据的源节点和负责对数据进行融合过滤的汇聚节点,汇聚节点同时也负责把数据传递给运输区。运输区的节点则相互协作地将生产区生成的数据“运输”到仓储和服务区。运输区采用一种将几何路由与泛洪相结合的方法来降低网络拓扑维护和路由发现的代价。RRP 可以让用户根据应用需求预先设定仓储区和泛洪区域大小,在保证传输可靠性的情况下达到期望的能耗水平、端到端延迟和路由代价。但是,RRP 的区域泛洪算法需要节点备有 GPS 模块来精确定位,而且它还需要用户在部署网络时合理划分功能区,精心考虑各区域中节点的位置,这在某些情况下是很难做到的。

SNMS^[7]是一种交互式的 WSN 网络管理系统,主要包括两个子系统:基于查询的网络健康状况监测系统和事件驱动的日志系统。用户通过 SNMS 的查询系统可以收集并监测诸如节点电量、节点附近的温湿度等信息,将其这些信息有助于预测可能出现的故障。日志系统则可以让用户设置感兴趣的事件,当事件发生时相应的节点将报告相关数据。SNMS 支持两种流量模式:收集和分发。收集模式用来获取网络健康状况数据,分发模式用来发布管理消息、命令和查询。

Deb 等人提出了 sNMP (sensor Network Management Protocol)^[9]的 WSN 网络管理架构。建立 sNMP 架构分为两个主要步骤:一是定义描述网络当前状态的网络模型和一系列的网络管理功能;二是设计提取网络状态和维护网络性能的一系列算法和工具。在 sNMP 中,关于如何进行网络拓扑信息的提取方面,Deb 等人提出了两个算法:TopDisc^[4]和 STREAM^[5]。TopDisc 算法的基本思想是将网络进行分簇管理,即在网络中找到一个能覆盖整个网络的最小节点集,这些节点作为各个簇的簇首节点。同时,在该簇首节点集合上生成通信代价最小的树状结构(TreC 树)。各个簇首节点收集网络拓扑信息,沿着 TreC 树将其反馈给管理站点,管理站点根据这些信息,可以近似地构建出整个网络的拓扑结构。TopDisc 算法有效地减少了拓扑发现的能量消耗。此外,管理站点还可以通过 TreC 树收集网络的其他状态信息,发布相关的管理命令。Deb 等人在 TopDisc 的基础上进一步提出了一种参数化的拓扑发现算法——STREAM。STREAM 算法的参数就是查询结果的详细程度,也就是说,在指定的详细程度下,STREAM 以相应的代价给出查询结果,这样用户就可以按照需求及网络状况以合适的代价获取网络的相关信息。

2.3 配置管理

配置管理从传感器网络中获取数据,并使用这些数据管理所有传感器节点的配置信息,掌握和控制传感器网络的状态,包括传感器网络内运行的传感器节点的状态以及节点的连接关系等内容。配置管理主要的作用是增强网络管理员对传感器网络的控制。无线传感器网络在电源能量、通信能力、计算和存储能力等方面都极度受限,在配置管理中主要体现在轻量级的网络拓扑控制和网络重编程技术的实现中,因此本文主要针对拓扑控制和重编程技术进行论述。

拓扑控制是节点感知和节点间通信的基础。在无线传感

器网络管理中拓扑控制主要包括 3 个方面:拓扑发现、睡眠周期管理和成簇管理方法。例如 TopDisc^[4]算法使用树结构,树的根节点是网络监测节点,用来发现整个网络的拓扑。STEM 算法^[10]用于睡眠周期管理,该算法中节点在大部分时间里用来感知数据,一旦把数据发送出去,就将节点无线发射装置关闭,等需要有数据时再开启通信设备。在 STEM 算法中最大的问题是延时。自适应自配置传感器网络拓扑算法^[11]是一种在高密度传感器网络中通过局部测量对网络的拓扑结构进行自动配置的休眠调度算法。现在有许多基于簇管理的算法用于拓扑管理,这些算法可以采用多种方式进行分类,如基于位置信息和不基于位置信息;分布式和集中式;基于节点 ID 和基于节点度。由于篇幅所限,有关算法的具体描述详见相关文献。

无线传感器网络重编程是在传感器网络首次部署完成后对其进行远程任务再分配、节点软件更新和网络功能重配置的过程。由于工作环境的不确定性和可变性,工作在无线传感网上的应用往往具有动态的功能和性能需求,并且事先计算好所有可能的运行条件,从而生成所有可行的系统配置一般来说是不可行的,因此重配置是无线传感器网络管理必须具备的重要功能。

在文献^[12]中,作者将传感网的软件重配分成 4 种:全二进制代码更新、模块二进制更新、虚拟机方式、参数调整。其中,参数调整方式灵活性小但开销也小;全二进制代码更新允许做任意的功能更改,其灵活性最强但开销也最大;模块二进制更新的灵活性与全二进制代码更新类似,但开销有所减少;虚拟机方式是指提供脚本并通过执行脚本完成重配,其灵活性主要受限于脚本,它也是目前被广泛使用的重配方法。

文献^[13]提出了一个在传感网中的基于约束的动态软件重配置方法。在一个领域特定的建模环境中,用 Sensor Network Reconfiguration Architecture Modeling Language 刻画传感网应用的设计空间;在根据运行环境监控结果得出需要重配时,将调用一个基于约束的设计空间开发工具 DESERT,用它对设计空间进行裁剪,保留可行的配置,并为每个传感器节点生成相应的配置文件;在这些配置文件分发到节点上后,由节点上的组件执行重配置指令,来停止活动组件、启动睡眠组件等。

文献^[14]基于控制论中反馈回路的概念提出了一个有效的环境自适应的应用重配置机制。在文献^[14]中,环境信息采用基于规则的知识表示,这些知识被用于决定当前环境中哪些应用应该被支持。相关知识只被部署到传感网中一次,此后传感网将自适应地重配置应用以适应环境的变化。在该机制的基础上,引入一个基于拉模式的范型,即由传感器节点主动发请求去获得重配脚本,从而实现传感网中的应用脚本分发。此外,该文还采用 Mate 的移动代码思想来实现应用脚本的分发。

文献^[12]展现了一个可从多个层次上支持传感网重配置的系统。系统基于一个由固定的静态的微内核和可动态添加、更新和删除的二进制模块组成的操作系统。操作系统之上是一个命令解释器,实现为一个动态可扩展的虚拟机,可解释执行以可移植的字节码编写的高级脚本。动态插入操作系统的二进制模块可向虚拟机注册定制的扩展,从而允许脚本访问模块引入的服务,例如可调整模块的参数。

文献[15]展示了如何根据用户偏好为资源感知的应用配置自动化系统。其核心思想是提供一个独立于应用的系统基础架构^[16]。这样的基础架构基于如下输入做出动态配置决策:描述用户对服务质量的需求、资源和服务的可用性以及作为分配到的资源的函数的应用保真度(Application Fidelity)。该结构的核心是一个分析模型以及相关的一个有效的近似最优配置决策的算法。文献[15]的工作受到像 Odyssey 和 Puppeteer 这样的多保真度和资源感知应用研究的启发,但解决了多组件集成、配置和重新配置的新问题。其配置的意义为选择和控制在应用中,以最小地影响用户任务的工作。这不同于其他研究中建构和安装新的应用到环境中的配置含义。

2.4 故障管理

传感器网络常常需要在无人干预的环境下长时间运行,而传感器节点众多,自身资源受限,使得网络中可能随时存在故障节点。传感器网络节点的故障包括传感器故障、通信故障、传感器节点故障 3 种,其中传感器故障会导致节点不断地向网络中注入采集到的错误数据,使得网络数据融合结果产生偏差,而通信故障和传感器节点故障都会导致部分数据丢失、造成区域断连。无线传感器网络故障管理按照其任务管理结构的差异主要分成 4 类:集中式结构、分布式结构、层次式结构和基于移动装置的结构。

MANNA^[3]是典型的集中式故障管理的代表。另外 Nithya Ramanathan 等人还提出了 Sympathy^[19],在此结构中,选择了 4 种标记参数,分别是邻居列表、链路质量、节点下一级跳转的两个最优选择和相关的下一级跳转的路径损耗。所有节点中的这些参数阶段性地被收集起来传递给基站,然后在基站处进行诊断,确认故障和定位故障。Winnie Louis Lee 等人^[8]提出了 WinMS,其包含有一个计划驱动的 MAC 协议、一个本地网络管理方案和一个中心网络管理方案。其中,计划驱动的 MAC 协议用于在一个树型结构的数据集中收集和广播管理数据;本地网络管理方案用于个体节点运行自身管理功能;中心网络管理方案用于控制核心管理节点,获得整个网络的整体信息,并可靠地运行、预防故障和修复故障的管理任务。

Somani 等人^[20]提出了分布式结构,用来对多处理器系统中有规律的相互连接结构发生故障的处理器进行诊断。Stefano Chessa 等人^[21]提出了一种用于无线 Ad-hoc 网络故障诊断的分布式技术,后来在此基础上又设计了用于无线传感器网络的分布式故障管理结构 WSNdiag^[22]。

Hsin Chih-fan 等人^[23]提出了邻居协作的分布式故障管理方法,用于监测传感器网络的网络运行情况。Ding Min 等人^[24]提出了一个故障节点的确认算法,每个节点基于自身测量值与从其邻居处读到的值进行比较,来确定自身状态是否有故障。Anmol Sheth 等人^[25]提出了改进的邻居协作方法,从网络协议栈的多个层中选用混合跨层参数来帮助完成决策过程,从而有效地减少数据吞吐量。

Gaurav Gupta 等人^[26]设计了一种分簇结构,在簇内运行管理网络的任务,将相关的传感器报告进行数据融合,并通过激活与要求的任务和计划相关的子集来管理传感器节点。Hsin Chihfan 等人^[27]提出了一种自监督的机制。在此结构中,设定一个平均更新时间间隔,如果相邻节点在此期间未接收到更新数据包,就认为此节点不工作或者不存在了,然后马

上将一个警报传递给控制中心,完成一个故障检测过程。Chen Jinran 等人^[28]提出了用于故障检测的投票表决式分布式算法。首先每个传感器节点根据比较自身测量值和来自于相邻节点的读取值的方法来判断自身值是趋向正确还是趋向错误,然后按照少数服从多数的原则投票确定节点最终的状态是否有故障。

Budhaditya Deb 等人提出的 TopDisc^[4]和 STREAM^[5]结构均为层次式结构。Nithya Ramanathan 等人介绍了 AppSleep 技术^[29]通过扩展休眠时间来达到减少能量消耗的目的,其使用的也是层次式结构。WSNMP 结构^[30]是另一种著名的层次式结构,此结构设计中心管理器在最高等级处,中间管理节点作为簇头,管理节点是普通的传感器节点。中间管理节点用于分担管理任务和协作收集管理数据,但不同路径中的中间管理节点之间不进行通信,完全独立地工作。

Wang Guiling 等人^[31]设计了一种基于移动装置的故障管理结构。网络中部署一部分可移动的传感器节点,可以从密度高的区域移动到密度低的区域,来弥补出现的网络覆盖漏洞。后来 Wang Guiling 等人^[32]又提出了另一种用于传感器节点重新定位的结构,包括两步:第一,采用基于单元格的方法在传感器网络中找到冗余的节点;第二,使用试探法将它们移动到目标位置。Le Tuan 等人^[33]提出了一种用于移动传感器网络的结构,思路是命令移动机器人或者移动节点移动到目标位置替代故障节点。Mei Yongguo 等人^[34]使用移动机器人设计了一种架构,在此结构中,管理节点是一个机器人,它接收故障报告并决定哪一个机器人去处理此故障。它可以尽量减少移动机器人消耗的移动能量和传感器网络中出现的额外信息开销。

集中式结构中 sink 节点作为管理者,收集所有节点信息并控制整个网络。在此结构中,管理者需要知道网络的全局信息,才能提供精确的故障管理,并且在这种方法中靠近管理者的节点能量消耗更大,这已经成为此结构的一个瓶颈。分布式结构中有多个管理者,每个管理者控制一个子网,并和其他管理者直接通信,协同工作以完成管理功能。相对集中式结构,分布式结构具有较低的通信开销,从而提供更好的可靠性和节能,但同时存储开销也增大;层次式结构是集中式和分布式架构的混合,采用中间管理者来分担管理功能,但这些站点之间不直接通信。每个中间管理者负责管理它所在的子网并把相关信息从子网发给上层管理站点,同时把上层管理站点的网管动作传达给它的子网。因此可以看出分布式结构和层次式结构是未来的发展方向,而基于移动装置的结构在一般环境中不常用。

2.5 安全管理

安全管理是指通过一定安全技术措施和管理手段,确保网络资源的保密性、可用性、完整性、可控制性、抗抵赖性,不致因节点设备、通信协议、网络服务、网络管理受到人为和自然因素的危害,而导致网络中断、信息泄露或破坏。安全管理目标就是通过适当的安全防范措施,确保网络系统中资源的 5 个基本安全属性(保密性、可用性、完整性、可控制性、抗抵赖性)得以实现,以满足传感器网络上业务开展的安全要求。

无线传感器网络的自身特点使得传感器网络安全又不同于传统网络安全,比如受限的计算、通信、存储能力,缺乏节点部署的先验知识,部署区域的物理安全无法保证以及网络拓

扑结构动态变化等,使得非对称密码体制难以直接应用。当前对传感器网络安全管理的研究,在概念和框架上,很多地方都借鉴了传统网络的相关成果,研究还不够深入。但有些具体的密钥管理方案和加密机制已经用于实际的系统中。

传感器网络缺乏网络基础设施、资源受限等特性使得诸多现有的密码算法难以直接应用,目前主要使用的是对称密码算法。但是在特定情况下,如访问控制等也使用低开销的非对称密码算法。随着传感器节点的能力越来越强,原先被认为不可能应用的密码算法的低开销版本开始被接受。

针对数据机密性、数据完整性、信息认证以及数据新鲜性等安全特性,A. Perrig 等人^[35]提出了传感器网络安全协议 SPINS,其中包含两个子协议:SNEP 和 μ TESLA。SNEP 是为传感器网络量身打造的,具有低通信开销,能够实现数据机密性、完整性、保证新鲜度,是简单高效的安全协议。

密钥管理是传感器网络的安全基础。所有节点共享一个主密钥方式,不能够满足传感器网络的安全需求。目前提出了许多传感器网络密钥管理方式,比如每对节点之间都共享一对密钥、每个节点与基站之间共享一对密钥、基本的随机密钥预分配模型、使用部署知识的密钥预分配模式和随机密钥预分配模型等。

传感器网络认证技术主要包含内部实体之间认证、网络和用户之间认证及广播认证。a) 传感器网络内部实体之间认证是基于对称密码学的,具有共享密钥的节点之间能够实现相互认证。b) 传感器网络对用户的认证主要用于当用户访问传感器网络,并向传感器网络发送请求时的情况。Z. Benenson 等提出保证了认证请求泛洪方法^[36]。c) 由于传感器网络的“一对多”和“多对一”通信模式,广播是节约能量的主要通信方式。基于传感器网络安全协议 SPINS 中的 μ TESLA 协议,D. Liu 等提议了多层和适合于多个发送者的广播认证协议^[37]。

目前提出了许多传感器网络路由协议,但是这些路由协议都非常简单,主要是以能量高效为目的设计的,没有考虑安全问题。比如,D. Ganesan 等提出了一种多路径路由机制^[38],B. Deb 等提出了 ReInForM 路由^[39]。

入侵检测是发现、分析和汇报未授权或者毁坏网络活动的过程。传感器网络入侵检测技术主要集中监测节点的异常以及辨别恶意节点上。由于资源受限以及传感器网络容易受到更多的侵害,传统的入侵检测技术不能够应用于传感器网络中。W. Ribeiro 等人^[40]提出通过监测恶意信息传输来标识传感器网络的恶意节点。A. Agah 等人^[41]通过博弈论的方法衡量传感器网络的安全。

在传感器网络中,敌人能够威胁若干传感器节点,因此相应的访问控制和权限管理机制是必需的。Z. Benenson 等人^[42]在具有顽健性传感器网络访问控制算法框架中,提出了 t 顽健传感器网络,其能够容忍 t 个节点被捕获。W. Zhang 等^[43]提出了传感器网络的权限管理,给移动用户分配能够完成任务的最小权限,并在监测到其受到威胁的时候,提供权限撤销机制。Satyajit banerjee 等人^[44]提出了基于对称密钥的传感器网络用户请求认证方式。

2.6 性能管理

性能管理通过评估传感器网络的运行状况及通信效率等性能参数,实现对传感器网络性能的分析检测。其能力包括

监视和分析被管传感器网络及其所提供服务的性能机制。性能分析的结果可能会触发某个诊断测试过程或重新配置网络,以维持网络的性能。无线传感器网络是涵盖了数据的感知、处理和传输功能并面向应用的任务型网络,其性能管理除了包括一系列传统的性能参数,还涉及能耗开销、网络生存周期、传输 QoS、网络感知 QoS 等更为广泛的 QoS 指标。

生存周期是指从网络部署开始工作到网络无法完成任务的时间。由于传感器节点通常由能量有限且不可再生的电池供电,因此在复杂的应用环境下如何延长网络的工作寿命就成为无线传感器网络的首要性能指标和重要研究内容。在无线传感器网络管理中,生存周期主要通过剩余能量管理来实现。E-Scan^[45]是一种具有数据融合的剩余能量扫描算法,相对于由节点主动汇报自己的能量状况的算法,它大大减少了能量消耗。E-Scan 不关心某个具体节点的剩余能量,而是关心某个区域内的能量状态特征,如最大值、最小值,因此它在扫描过程中,对同一区域内的节点进行相似能量状态的合并。这样,管理人员最终得到各个不相交区域的能量状态特征,据此可以绘制网络的剩余能量示意图。

传输 QoS 主要包括传输可靠性(丢包率)、传输时延和传输实时性等。传输可靠性定义为目的节点成功接收到的数据包相对源节点实际发送的数据包的百分比。虽然在无线传感器网络中冗余节点和冗余数据大量存在,但数据传输的可靠性始终是各种应用服务的基础;传输时延是指从源节点到目的节点传输一个(或一组)数据包所需的总时延,具体包括传播时延、排队时延和路由时延等;传输实时性在无线多媒体传感器网络传输图像或视频时更为关注。文献^[46]提出了一个支持实时数据传输的大规模传感器网络通信架构,该方案主要针对提供实时性的 QoS 保障,利用基于地理位置属性和定时器来实现事件的登记和查询,采用了位置标识的传输协议、地理位置路由协议、速度单调调度策略和支持优先级的 MAC 协议。虽然该架构提供了不同网络层次 QoS 的具体解决方法,但由于其仅面向实时传输的应用场景,因此不具备在整个无线传感器网络中的扩展性。

无线传感器网络的核心目标是协作地感知、采集和处理网络覆盖区域内目标对象的信息或事件。网络感知 QoS 衡量了整个网络节点协作的服务能力,是保障整个网络正常工作的基础。在网络感知 QoS 中网络覆盖率是其一个基本问题,并且该问题也会对目标监测和跟踪产生一定的影响。文献^[47]提出如何在多项式时间内查找最大裂口路径和最大支持路径,即最差和最好的监测到的区域。文献^[48]被讨论了如何查找最小和最大曝光路径,即目标被监测的时间。文献^[49]描述了基于探测器的密度控制算法,即把一些节点放到节点稠密区域,以确保长时间、健壮性的覆盖。文献^[50]研究了基于簇的分布式传感器网络的效能和覆盖的关系,并提出了 Virtual Force Algorithm 算法。覆盖质量即最好情况和最坏情况的覆盖距离在文献^[51]中进行了讨论并给出了算法。文献^[52]讨论了传感器网络中各种“盲区”的分类、特征及对传感器网络的影响,如覆盖盲区、路由盲区、收发盲区等。文献^[53]提出的一种基于概率覆盖模型的密度控制算法,能够在保证足够的网络覆盖能力的前提下,关闭掉冗余节点,减少网络的总能量消耗。文献^[54]介绍了无线传感器网络基于节点之间连通性来估计节点位置的定位算法。

2.7 计费管理

由于传统网络中计费管理负责根据 IP 地址对流量进行双向统计,故按照特定的计费策略计算网络费用;而在传感器网络中,共享资源主要是网络带宽,由于采用免费的无线频段,并且目前无线传感器网络的应用还未进入大规模产业化阶段,现仍是面向应用的定制的封闭网络,因此计费并非无线传感器网络的主要问题。但是随着无线传感器网络的进一步发展和应用市场的进一步推广,无线传感器网络将逐步朝向如下商业模式发展:运营商管理运营共性平台,为应用子集提供支撑,并提供计费;第三方负责维护应用子集平台,为用户提供差异化服务,并收取费用。到那时,关于如何向用户收取费用的问题便变得非常关键和重要,也即计费管理成为必需的管理功能。并且,针对网络的数据安全问题,如网络中数据的真实性与可靠性、数据版权保护等,将更多地把数字水印等技术引入到无线传感器网络中。

结束语 到目前为止,对无线传感器网络管理的理论和技术的研究还处于起步阶段。但是,已经有越来越多的研究者开始关注这一领域,相信网络管理将成为无线传感器网络研究的下一个热点。可以预见,无线传感器网络管理将在下列几个方面进一步开拓发展:

现有的无线传感器网络管理系统都不具备完全的网络管理功能,而且绝大多数现有系统都是与应用相关的。设计一个有效的、通用的网络管理架构来支持不同应用服务下的传感器网络,是一个公开的难题。同时,无线传感器网络自身的特性也使得无线传感器网络管理的设计和实施与传统的网络管理有着显著的差别,具有很多亟需解决的问题。

分布式人工智能和主动网络技术将在无线传感器网络管理中扮演越来越重要的角色。分布式管理架构将成为主流,管理智能将进一步下放。从工程的角度看,中间件技术是分布式人工智能和主动网络技术的基础,它在无线传感器网络管理中的作用将会越来越得到重视。

网络管理的基础是网络状态、性能参数等关键信息的测量。传统网络测量技术关注的是具体网络设备的健康状况,但这并不完全适合无线传感器网络。无线传感器网络测量应该将网络整体以及网络节点间的协作行为作为测量对象。因此针对无线传感器网络特性,开发相应的测量技术,也将是无线传感器网络管理研究的一个热点。国内外已经有一些学者开展了相关工作。

参 考 文 献

- [1] Heinzelman W, Chandrakasan A, Balakrishnan H. An Application-specific Protocol Architecture for Wireless Microsensor Networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2002, 1(4): 660-670
- [2] Song H, Kim D, Lee K, et al. Uppn-based Sensor Network Management Architecture[C]//Proc. ICMU Conf. Apr. 2005: 120-125
- [3] Ruiz L B, Nogueira J M, Loureiro A A F. MANNAA: Management Architecture for Wireless Sensor Networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2003, 41(2): 116-125
- [4] Deb B, Bhatnagar S, Nath B. A Topology Discovery Algorithm for Sensor Networks with Applications to Network Management[R]. DCS-TR-441. Rutgers University, May 2001: 76-79
- [5] Deb B, Bhatnagar S, Nath B. STREAM: Sensor Topology Retrieval at Multiple Resolutions[J]. Kluwer Journal of Telecommunications Systems, 2004, 26(2): 285-320
- [6] Liu W, Zhang Y, Lou W, et al. Managing Wireless Sensor Network with Supply Chain Strategy[C]//Proc. IEEE QSHINE Conf. Oct. 2004: 391-402
- [7] Tolle G, Culler D. Design of an Application-cooperative Management System for Wireless Sensor Networks[C]//Proc. EWSN. Feb. 2005: 121-132
- [8] Lee W L, Datta A, Cardell-Oliver R. Network Management in Wireless Sensor Networks[M]. Handbook of Mobile Ad Hoc and Pervasive Communication, 2007: 234-253
- [9] Deb B, Bhatnagar S, Nath B. Wireless Sensor Networks Management[EB/OL]. http://www.research.rutgers.edu/~bdeb/sensor_networks.html, 2005
- [10] Schurgers C, Tsiatsis V, Ganeriwal S, et al. Optimizing sensor networks in the energy-latency-density design space[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2002(1): 70-80
- [11] Cerpa A, Estrin D. ASCENT: adaptive self-configuring sensor networks topologies[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2004, 3(3): 272-285
- [12] Balani R, Han C, Rengaswamy R K, Tsigkogiannis. Multilevel Software Reconfiguration for Sensor Networks[C]//the 6th ACM & IEEE International Conference on Embedded Software (EMSOFT'06). 2006: 112-121
- [13] Kogekar S, Neema S, Koutsoukos X. Dynamic Software Reconfiguration in Sensor Networks[C]//International Conference on Sensor Networks-SENET. August 2005: 413-420
- [14] Zhang Dongmei, Ma Huadong, Liu Liang, et al. EAAR: An Approach to Environment Adaptive Application Reconfiguration in Sensor Network[C]//MSN 05. First International Conference of Mobile Ad-hoc and Sensor Networks. Wuhan, China, December 2005: 259-268
- [15] Poladian V, Sousa J P, Garlan D, et al. Dynamic Configuration of Resource-aware Services[C]//the 26th International Conference on Software Engineering I(CSE'04). 2004: 604-613
- [16] Sousa J P, Garlan D. Improving User-awareness by Factoring it out of Applications[C]//System Support for Ubiquitous Computing Workshop(UbiSys). 2003: 121-130
- [17] Neugebauer R, McAuley D. Congestion Prices as Feedback Signals: An Approach to QoS Management [C]//Proc. ACM SIGOPS European Workshop. 2000: 91-96
- [18] Capra L, Emmerich W, Mascolo C. CA RISMA: Context-aware Reflective Middleware System for Mobile Applications[J]. IEEE Transactions on Soft Eng, 2003, 29(10): 929-945
- [19] Ramanathan N, Kohler E, Girod L. Sympathy: a debugging system for sensor networks[C]//29th Annual IEEE International Conference of Local Computer Networks. 2004: 554-555
- [20] Somani A, Agarwal V. Distributed diagnosis algorithms for regular interconnected structures[J]. Computers, IEEE Transactions on, 1992: 899-906
- [21] Chessa S, Santi P. Comparison-based system level fault diagnosis in ad hoc networks[C]//Proc. SRDS'01. New Orleans, LA, October 2002: 257-266
- [22] Chessa S, Paolo S. Crash faults identification in wireless sensor networks[C]//Pisa: Istituto di Matematica Computazionale del

- [23] Hsin C, Liu M Y. A distributed monitoring mechanism for wireless sensor networks[C]//3rd Workshop on Wireless Security. 2002;57-66
- [24] Ding M, Chen D, Xing K, et al. Localized fault-tolerant event boundary detection in sensor networks[C]//Proceedings of 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. 2005;902-913
- [25] Sheth A, Hartung C, Han R. A decentralized fault diagnosis system for wireless sensor networks[C]//Mobile Adhoc and Sensor Systems Conference. 2005;192-194
- [26] Gupta G, Younis M. Fault-tolerant clustering of wireless sensor networks[C]//Wireless Communications and Networking, 2003 (WCNC 2003). 2003;1579-1584
- [27] Hsin C, Liu M. Self-monitoring of Wireless Sensor Networks[C]//Computer Communications(2005). 2006;462-478
- [28] Chen J, Kher S, Somani A. Distributed fault detection of wireless sensor networks[C]//ACM DIWANS'06. 2006;65-71
- [29] Ramanathan N, Yarvis M, Chhabra J, et al. A stream-oriented power management protocol for low duty cycle sensor network applications [C]//Embedded Networked Sensors. 2005;53-62
- [30] Alam M M, Mamun M, Hong C S. WSNMP: A network management protocol for wireless sensor networks[C]//10th International Conference of Advanced Communication Technology, 2008;742-747
- [31] Wang G, Cao G, Porta T L. A bidding protocol for deploying mobile sensors [C] // 11th IEEE International Conference on Network Protocol(ICNP'03). 2003;315-324
- [32] Wang G L, Cao G H, La P, et al. Sensor relocation in mobile sensor networks [C]//24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM 2005). 2005;2302-2312
- [33] Le T, Ahmed N, Parameswaran N, et al. Fault repair framework for mobile sensor networks [C] // IEEE COMSWARE. 2006;123-126
- [34] Mei Y, Xian C, Das S, et al. Repairing sensor networks using mobile robots [C] // Proceedings of the ICDCS International Workshop on Wireless Ad Hoc and Sensor Networks. 2006;231-240
- [35] Perrig A, et al. SPINS: security protocols for sensor networks [J]. Wireless Networks Journal(WINE), 2002;521-534
- [36] Benenson Z, et al. Realizing robust user authentication in sensor networks[C]//Workshop on Real-World Wireless Sensor Networks(REALWSN). Stockholm, 2005;135-142
- [37] Liu D, Ning P. Multi-level μ TESLA: a broadcast authentication system for distributed sensor networks[C]//ACM Transactions on Embedded Computing Systems(TECS). 2004;800-836
- [38] Ganesan D, et al. Highly-resilient, energy-efficient multipath routing in wireless sensor networks [J]. Mobile, Computing and Communication Review, 2001, 5(4): 10-24
- [39] Deb B, et al. ReInForM, reliable information forwarding using multiple paths in sensor networks[C]//Proc. 28th Annual IEEE Conf on Local Computer Networks(LOCN). Los Alamitos, 2003; 406-415
- [40] Staddon J, et al. Efficient tracing of failed nodes in sensor networks[C]//Proc. of the First ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications. Atlanta, Georgia, 2002;122-130
- [41] Agah A, et al. Intrusion detection in sensor networks: a non-cooperative game approach[C]//IEEE International Symposium on Network Computing and Applications. 2004;2902-2906
- [42] Benenson Z, et al. An algorithmic framework for robust access control in wireless sensor networks[C]//2nd European Workshop on Wireless Sensor Networks (EWSN). Istanbul, 2005; 158-165
- [43] Zhang W, et al. Least privilege and privilege deprivation: towards tolerating mobile sink compromises in wireless sensor networks[C]//Proc. IEEE Symposium on Security and Privacy. Illinois, 2005; 378-389
- [44] Banerjee S, et al. Symmetric key based authenticated querying in wireless sensor networks[C]//Proceedings of the First International Conference on Integrated Internet Ad hoc and Sensor Networks(InterSense '06). Nice, France, 2006;22-30
- [45] Zhao J, Govindan R, Estrin D. Residual energy scans for monitoring wireless sensor networks[C]//IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC '02). vol 1, Orange County Convention Center, Orlando, FL, USA, March 2002; 356-362
- [46] Lu C, Blum B, Abdelzaher T, et al. RAP: A real-time communication architecture for large-scale wireless sensor networks[C]//Proceedings of the IEEE RTAS. San Jose, California, 2002; 55-66
- [47] Hunang Chiufu, Tseng Yuchee. The coverage problem in a wireless sensor network [C] // Mobile Networks and Applications. 2005;519-528
- [48] Veltri G, Huang Q, Qu O, et al. Minimal and maximal exposure path algorithms for wireless embedded sensor networks[C]//ACM International Conference on Embedded Networked Sensor Systems(SenSys). 2003;40-50
- [49] Ye F, Zhong G, Lu S, et al. PEAS: a robust energy conserving protocol for long-lived sensor networks[J]. International Conference on Distributed Computing Systems. 2003;154-162
- [50] Zou Y, Chakrabarty K. Sensor deployment and target localization in distributed sensor networks[C]//ACM Transactions on Embedded Computing Systems. 2004;61-91
- [51] Huang Hai, Richa A. Dynamic coverage in ad-hoc sensor networks[C]//Mobile Networks and Applications. 2005;9-17
- [52] Ahmed N, Kanhere S S, Jim S. The holes problem in wireless sensor networks: a survey[C]//Mobile Computing and Communications Review. 2005;4-18
- [53] 柳立峰, 邹佳洪, 张雷, 等. 基于概率覆盖模型的无线传感器网络覆盖度控制算法[J]. 北京邮电大学学报, 2005, 28:14-17
- [54] 彭刚, 曹元大, 孙利民. 无线传感器网络节点定位机制的研究[J]. 计算机工程与应用, 2004, 35:27-29