

无线传感器网络应用支撑技术研究^{*}

荆琦¹ 唐礼勇¹ 陈洲峰² 王昭¹

(北京大学信息科学技术学院 北京 100871)¹ (交通部水运科学研究院 北京 100088)²

摘要 无线传感器网络的出现,产生了许多新型应用。而为了支撑各种各样的应用,需要范围广且复杂的实现技术。作为一个多学科交叉领域,无线传感器网络方向具有大量的应用及相应支撑技术,需要进行适当的分类整理。基于这种情况,本文首先综述了无线传感器网络的应用现状,然后结合无线传感器网络各方面应用,从计算机学科的角度系统地讨论了无线传感器网络的支撑技术,包括通信协议、定位、时钟同步、能量管理等普遍存在于各种无线传感器网络的基础支撑技术,以及目标识别与跟踪、数据存储、数据融合与无线传感器网络安全等几种典型的与应用紧密相关的支撑技术。

关键词 无线传感器网络,支撑技术,自组织网络,数据中心

Application and Underlying Technique of Wireless Sensor Networks

JING Qi¹ TANG Li-Yong¹ CHEN Zhou-Feng² WANG Zhao¹

(School of Electronic Engineering and Computer Science, Peking University, Beijing 100871)¹

(Waterborne Transportation Institute of MOC, Beijing 100088)²

Abstract Based on Wireless Sensor Networks (WSNs), new types of applications become possible, including military applications and industrial applications. To support these applications, a wide range of techniques is needed. In fact, as an interdisciplinary subject, WSNs has lots of applications and underlying techniques, which need a classification and summary. In this paper, various WSNs applications are surveyed, based on which, diverse underlying techniques are discussed from the point of view of computer science, including basic techniques such as communication protocols, localization, time synchronization and energy management, and techniques closely related to applications such as object identification and tracking, data storage, data aggregation and the security of WSNs.

Keywords Wireless Sensor Networks (WSNs), Underlying technique, Ad Hoc networks, Data centric

近年来,随着无线自组织网络(ad hoc networks)的快速发展,IEEE的802.11、802.15、802.16系列,ETSI的Hiper-Lan以及Zigbee等标准的相继出台,出现了包括移动自组织网(MANET, Mobile Ad-hoc Networks)、无线个域网(WPAN, Wireless Personal Area Networks)、Mesh网等多种无线Ad Hoc网络形式。而WSNs作为无线Ad Hoc网络的一种也受到了高度关注。由于上述各网络形式定义角度不同,因此相互之间分类界限并不是十分明确。WSNs是指由大量无线传感器节点组成的自组织网络,其起源至少可以追溯到1978年由美国国防部高级研究计划署(DARPA)发起的Distributed Sensor Nets Workshop,军事监控是公认的WSNs发展的主要驱动力。目前,美国、日本、欧盟和中国等都非常重视WSNs相关领域的研究,许多跨国公司也相继开展了WSNs的相关研发;国内的大学和科研单位相继开展了WSNs的研究。

当前无线传感器网络的研究主要分为两类:传感器及其网络在实际应用环境中的构建;传感器网络理论研究。前者着重研究无线传感器节点的制造及各项性能的优化、传感器网络的搭建及具体应用的实现,以及WSNs在实际应用中出现的某些具体问题的解决方法,所有讨论都是建立在完整的WSNs应用环境下的,尽可能考虑所有相关的技术及环境因

素,如噪声、地形、信道拥塞及传感器节点自身的性能缺陷等,其目标往往是建立一个真实可用的WSNs。而后者则将问题从真实系统中抽象出来,在忽略某些技术问题和环境因素的基础上加以解决。目前许多研究工作都集中在理论研究方面。如许多模型都假设相同节点布撒在无阻碍的欧几里德平面上,即对于任意两个节点,只要其距离在信号传输范围之内,就被认为是可以通信的。但是实际布撒时,各种复杂的实际地形状况常常使得这一假设不成立。现在对WSNs应用环境和背景的讨论越来越受到重视,一方面是因为与当前许多其它网络形式相比,WSNs还缺乏广泛的应用支撑;另一方面是因为WSNs理论研究的快速发展。但是,由于对问题的实际应用背景考虑不足,一些研究的假设前提使得该研究在实际应用中意义不大。不过,当前无论是WSNs理论研究还是应用实现,都是被广泛关注的领域。

1 WSNs的典型应用

WSNs通常是应用相关的,即根据不同应用,其各方面的功能性能指标往往有所不同,部件、协议设计以及数据管理等关键技术也会有较大差别。了解WSNs的应用是进行WSNs各方面研究的前提,使研究更有方向性从而更有实际意义。近年来WSNs的典型应用可以归结为以下几方面:

^{*}国家自然科学基金(60673182),科技部国际科技合作重点项目(2005DFA10920)。荆琦 博士研究生,主研方向为网络与信息安全;唐礼勇 副研究员;王昭 讲师。

(1) 军事应用

军事应用一直是 WSNs 的主要应用场景和发展推动力,涉及到的功能需求包括战场信息搜集、敌我目标分类、敌方行动追踪以及战场环境监测等,各项功能相辅相成,各有侧重。在战场监测方面,WSNs 可以替代现有的布雷方式,后者可能会对未来造成很大危害。弗吉尼亚大学开发了利用 WSNs 部署的入侵监测防卫系统^[1]。在敌方行动追踪方面,文[2]介绍了一个用在敌我追逐场景下的定位和追踪敌方行动的系统;俄亥俄州立大学开发了一个通过对金属物质进行分类和追踪以达到追踪车辆和佩械士兵的系统。此外,Palo alto 研究中心试图通过安装了麦克风和可控摄像头的传感器识别可疑目标,利用大量该类传感器的协调工作达到跟踪特定物体的目的。尽管上述项目的研究背景都是军事应用,其成果也可应用到更广阔的民用领域。

(2) 环境监测

环境监测是 WSNs 的另一个主要应用场景,主要包括:

· 室内环境监测

包括对室内温度、光照、房屋状况、空气流通及空气污染等方面的监测,可以根据实际需要选择具体功能。SABER 已经致力于该方面的研究^[5]。CITRIS 的人员在 U. C. Berkeley 的 Cory 大厅部署了用于监测室内光线和温度的 WSNs。室内环境监测可以为人类提供健康舒适的生活环境,节省不必要供暖或者制冷带来的能源浪费。

· 突发事件服务

在室内及周边环境部署 WSNs,可以对突发灾难性事件进行预警,以及为事件处理和善后工作提供很大的帮助。当火灾或者地震等突发事件发生时,部署在相应环境中的 WSNs 可以根据光线强度和烟雾浓度等监测数据,为人们提供逃生通道^[5]。通过在建筑的主要构架部署 WSNs 探测建筑物震动情况,可以监测地震后房屋受损程度。

· 室外环境监测

该类应用是目前 WSNs 最主要的民用领域之一,最具代表性的项目就是 2002 年用来监测一种海燕的生存环境及其在气候变化时的行为的 GDI 系统^[3]。夏威夷大学在火山国家公园部署了 WSNs 进行生态环境监测,以揭示为何特定物种只能生存在某些特定环境中。UCLA 的 CENS 将其开发的 NIMS 系统部署到一片实验性森林中,用来研究森林阴地与生态环境地的相互作用。此外,WSNs 还被用于天气预报、洪水预警、土壤大气温湿度检测等方面。这类应用一般需要大地理范围的网络部署,很多项目都需要较长周期的数据获取。

(3) 商务应用

英国石油公司与 CoBIs 项目和 Accenture Technology 实验室合作,利用 WSNs 进行仓储管理^[4]和货运跟踪,这也是 WSNs 的典型商务应用。还有一个较为著名的项目是 CITRIS 开发的智能电力配送与消费系统。电力部门在住户电器部署传感器来发现故障和过度耗费,通过室内环境参数调整避免峰值出现。此外,WSNs 还广泛应用在造纸^[6]、航运^[4]等诸多方面。

(4) 医疗相关应用

该类应用包括人体生理数据的收集和跟踪、器官状况监测、癌症发现以及对病人、医生及药剂师的监控等方面。文[7]介绍了一个包括 100 个传感器的人造视网膜,可以帮助失明及弱视患者得到可以接受的视觉感受。英特尔实验室通过

部署 WSNs 来帮助解决老年人健康问题。该类应用可能需要将 WSNs 部署在人体内,这要求传感器体积尽可能小、部件尽可能安全可靠,通过人体热能进行能量控制也是其特点之一。

(5) 机器人相关应用

有很多应用将 WSNs 和机器人技术相结合,利用机器人的移动性来弥补相对静止的 WSNs 的不足。如可以通过机器人对 WSNs 进行部署,以达到在大规模区域内的密集控制,同时 WSNs 为机器人提供方位指导信息。英特尔研究室将机器人作为 WSNs 的接入代理,还研究利用机器人为 WSNs 提供能量补充、发现故障传感器、进行硬件维护和配置、部署传感器以解决连通问题等。

上述各类应用中所开发的 WSNs 在规模、功能、性能等各方面都有很大差异。比如环境监测和人体监测,对对传感器个体的体积要求、生命周期,到 WSNs 部署的区域范围、密集度,都有非常大的区别,从而导致从传感器的底层硬件设计到上层网络功能的实现也存在巨大差别。

2 WSNs 的支撑技术

由于无线传感器网络的资源有限,其能量、存储能力、计算能力都低于传统无线网络中的移动设备,而且一般情况下还具有大规模、高密度等特点,因此传统无线网络的各种应用支撑技术很多都不再适用于无线传感器网络。当前 WSNs 的支撑技术,一部分是在原有无线网络相关技术的基础上针对 WSNs 的特点加以改进,另外一些则是重新设计的低功耗方案。以下将无线传感器网络的支撑技术分为适用于绝大多数无线传感器网络的基础支撑技术和面向各类型应用的应用支撑技术分别加以讨论。

2.1 WSNs 基础支撑技术

(1) 通信协议

通信协议对于所有网络都是必不可少的基础支撑技术。WSNs 的通信协议与其它网络相比还不成熟,没有统一的标准,改进空间很大,研究非常活跃。根据低功耗的目标,WSNs 的协议设计尽量简化,通信协议分层并不明确,跨层设计受到青睐。下面我们还是根据传统的方式对各层协议设计加以介绍。

① MAC 协议

已有的无线网络 MAC 协议的设计目标主要是为蜂窝网提供 QoS 和高带宽,即使是无线 Ad Hoc 网络的 MAC 层协议设计一般也只是加入自组织和移动的设计考虑。而 WSNs 的 MAC 层协议的主要设计目标则是低功耗,尽量延长网络寿命,其次则是良好的扩展性和适应性,与已有的协议存在很大差异。

文[8]对 WSNs 在 MAC 层的主要能量浪费做了较为详细的分析,包括接收数据包时发生碰撞、串音(overhearing,节点收到不是发给自己的数据包)、过多的控制包、空闲侦听等。这些因素都是在 WSNs 的 MAC 层协议设计时应该尽量避免的。

MAC 层协议的基本类型包括 TDMA、FDMA、CDMA 和 CSMA。其中 TDMA、CDMA 和 FDMA 从机制上避免了冲突访问,而 CSMA 则引入竞争机制来检测冲突(CD)或者避免冲突(CA)。WSNs 的 MAC 层协议需要低能耗设计,尽量减少上述各种原因引起的能量浪费,并考虑节点的睡眠状态。现有的许多 WSNs 的 MAC 层协议就是在上述三种协议的基

本架构上,针对 WSNs 进行了低功耗改进。基于 TDMA 设计的 WSNs 的 MAC 层协议有 SMACS、Eavesdrop-And-Register (EAR)、DE-MAC、EMACS 以及 TRAMA 等。基于 FDMA 的有 Implicit Prioritized Access Protocol 等。基于 CSMA 的 MAC 协议占 WSNs MAC 协议的大部分,这种 MAC 协议一般需要通过附加的控制消息来解决隐藏节点问题,如 Sensor-MAC protocol (S-MAC) 的握手、Timeout MAC (T-MAC) 等。也有一些不需要任何控制信息,如 CSMA 与扩谱相结合的^[9]以及基于自适应码率控制的^[10]。此外,基于 CSMA 的其它 MAC 协议还有基于竞争窗口的 CSMA 协议 Sift、文^[11]的射频协议、WiseMAC、Aloha、基于 802.11 的实时通信协议^[12]等。

此外,在 WSNs 的 MAC 层协议设计中,灵活的混合访问模式受到了很大关注。混合访问机制包括两种:一种是跨层设计^[13~17],主要是引入网络层路由信息来优化 MAC 层设计,如文^[14]根据网络层的能耗来调整 TDMA 的时间槽;还有就是多种访问方式相结合^[13,18],比如 WiseMAC^[18]就是数据包采用 TDMA,控制包则采用 CSMA。

②路由协议

路由协议是通信协议极其重要的一环。WSNs 路由协议的设计除了需要考虑资源限制外,还具有许多特异性:以数据为中心的路由在 WSNs 中很受关注,几乎所有应用都存在节点与基站之间多对一的数据传输,此外要考虑数据冗余等问题。根据上述 WSNs 中路由协议的设计考虑,出现了许多针对各种 WSNs 的路由协议,一般根据数据路由的方式可以分为三类:

• 以节点为中心的路由

以节点为中心的路由是传统的路由方式,节点用唯一 ID 标识,并通过这些标识进行路由,如当前的因特网路由。以节点为中心的路由最大的特点就是路由功能严格与上层应用分离,如 WSNs 中最主要的两种信息服务查询(query)和发现(discovery)就只能通过应用层实现,这种明确的分层实现对于应用相对简单的 WSNs 往往产生不必要的耗费。

• 以数据为中心的路由

以数据为中心的路由是一种按需设计(on demand),即当需要时通过查询的方式获得特定数据,节点用所采集的数据表示,根据数据的内容进行路由。SPIN 是最早的以数据为中心的路由协议;直接扩散(Directed Diffusion)是目前最为著名的以数据为中心的协议;此外还有 RR、CADR、COUGAR 以及 ACQUIRE 等。以数据为中心的路由一大特点就是具有应用特异性,即数据的命名与应用紧密相关。查询和发现是内置在路由协议的设计中的,并且由于数据内容可知,因此可以在路由的过程中进行数据融合来减少数据冗余。

• 基于地理信息的路由

基于地理信息的路由是自组织无线网络所特有的一种路由方式。它将节点的位置信息引入路由机制,节点用地理信息标识,根据距离估算通信能耗,以低能耗为目标建立通信拓扑,如 MECN、SMECN、GAF、GEAR 等。

此外,还可以根据网络的通信拓扑结构,将 WSNs 路由分为平面路由、分级路由和混合路由。其中,分级路由一般是指带有簇结构的路由,包括静态簇结构(簇头节点不变,成员不变)和动态簇结构(簇头节点动态选举产生,成员有可能根据需求改变)。所有的节点都将数据发送给簇头节点,通过簇头节点进行数据融合。LEACH 是最早的带有簇结构的路由

协议之一,此外还有 PEGASIS、Hierarchical-PEGASIS、TEEN、APTEEN 和 EARCSN 等。这些传统的层次路由协议是单跳的,假设所有节点都可直接与基站通信。文^[19]提出一个较新的层次路由,由能力较强的节点形成覆盖全网的主干。主干上的节点可以是高配置的特异节点,也可以是被选举出的能力相对较强的普通节点,相当于在网络上又架构了一层通信网。混合路由是指在路由过程中根据具体需要不同采取不同的路由方式。如 GEAR 先通过平面路由将数据包传送至目标区域,然后通过区域内有限制的泛洪将数据包发给区域内所有节点,后者可以视为簇内的多播。

除了上述两种比较基本的分类方法,WSNs 路由还可以根据设计目标、运行方式、实现方法等分类,如基于协商的路由(如 SPIN)、QoS 路由(SAR, SPEED)、基于查询的路由等。由于 WSNs 的节点极易出现被俘获、电能耗尽以及器件故障等情况,因此 QoS 路由的概念较为重要。QoS 路由以服务质量为目标,以低丢包率或/和高速通信为首要目标,常用的手段包括多路路由、网络编码及拥塞控制等。

③传输协议

因特网的 TCP 和 UDP 协议是两个著名的传输协议,但并不适合 WSNs 的需求。TCP 协议需要一个握手过程,但是一般 WSNs 中每次传输的数据量很小,所以相对来说握手的能耗过大。而且 TCP 通过端到端的方式来控制拥塞和保证可靠性,在链路非常不可靠的 WSNs 下会花费很长时间,ACK 在网络中的端到端传输也会耗费很多能量。由于 UDP 没有拥塞控制,当拥塞发生时丢掉大量数据包,耗费能量,对 WSNs 来说也不合适。不过,这种无连接较为适合 WSNs 环境,或者也可以简化连接初始化过程。

WSNs 下的传输协议应该提供拥塞控制和保证可靠性。WSNs 数据传输具有爆发性,而且 sink 周围的数据传输量非常大,所以有效的拥塞发现、避免和控制机制是非常必要的。虽然 MAC 层可以提供数据包错误恢复,但是对于丢包就需要传输层来控制。WSNs 下的可靠性保证,一般并不需要严格保证所有的数据包可靠传输,只需要保证某一区域内的数据包可以正确传输,或者某一概率的数据包可以正确传输即可,根据这个特点可以进行优化设计。此外,低功耗的 WSNs 传输协议在发生拥塞时应该尽量避免弃包,而且保证节点流量尽可能地均匀。

WSNs 中的传输协议根据其设计目标不同可以分为上传拥塞控制、下传拥塞控制、上传可靠性保证以及下传可靠性保证四类,包括 CODA、ESRT、RMST、PSFQ、GARUDA、ATP 以及 SenTCP^[20]等。跨层设计虽然目前不多,但是对 WSNs 来说非常适合,比如路由的错误信息可以使传输协议知道数据包的丢失不是因为拥塞发生,从而不需要进行拥塞控制。

(2)能量管理

低能耗在 WSNs 中是贯穿始终的设计理念,通信单元负责节点与其它节点或者网络代理等设备之间的无线通信,即无线信号的收发功能,一般被认为是整个结构中能耗最大的部分,从物理层到应用层各层面的设计都要将低能耗作为最主要的设计目标之一。广义的能量管理包括所有 WSNs 中需要考虑能耗的部分,如节点的功率控制、低功耗的 MAC 协议和路由协议、应用中的采样率控制、数据融合等。一些节点的信号发射功率是固定的,但是有些节点却设计成信号发射功率可变的。例如第二代 μ AMPS 原型节点的能量消耗水平有 13 级,有关闭状态、空闲状态、接收状态、低功耗传输状态、高耗

传输状态等六种状态。除此之外,还有许多中间状态。而低耗的 MAC 尽量使节点处于睡眠状态来降低能耗。

狭义的能量管理主要是指围绕电池的各种控制。节点各部件之间的协同需要精心设置,如当节点部件工作电压由 2.7V 降到 2.0V 时,在同样电能的情况下,节点生命周期可能会延长 5 倍^[21],所以当前根据传感器节点在不同时段的不同工作模式采用动态功率管理、动态电压调度等进行能量管理和控制。需要长时间数据采集的传感器有的会需要太阳能、人体电能等周边能量收集、无线充电以及移动机器人充电等方式来维持节点的正常运转。

(3) 时钟同步

由于晶体振荡器频率的差异及诸多物理因素的干扰,无线传感器网络各节点的时钟会出现时间偏差。而时钟同步对于无线传感器网络非常重要,如安全协议中的时间戳、数据融合中数据的时间标记、带有睡眠机制的 MAC 层协议等都需要不同程度的时间同步。

网络中的时间同步一般都需要通过节点间交换包含时间信息的信息完成,消息交换的过程中会受到不同原因的时间延迟影响,进而影响时间同步的精确性。整个消息交换过程中的时间延迟主要包括:发送端构造消息的延迟、发送端等待发送信道可用而产生的延迟、消息从发送端网卡传送到接收端网卡的延迟、消息被接收处理的延迟等四个主要部分。可以通过细化延迟提高精度,将延迟细化为 FTSP 发送中断处理、时延、编码时延、传播时延、解码时延、字节对齐时延、接收中断处理时延。

时钟同步分为三类:①简单比较事件或者消息的先后顺序(通过本地时钟);②维护本地时钟及其与周边节点时钟的相差与频差,需要时推算同步,大部分 WSNs 的时钟同步都属于这类,包括 RBS、Tiny-Sync and Mini-Sync、LTS 等;③维护全局的时钟,如 TPSN。此外,还可以从发送者、接受者的角度分类:①基于发送者,中心节点单向发送同步包,需要先发送前导码和同步码,如 DMTS、FTSP;②基于发送者-接收者,采用传统的、双向的消息交换的方式类似 NTP,发送者和接收者双向交互信息,如 TPSN、Tiny-Sync 和 Mini-Sync 等;③基于接收者-接收者,第三方广播消息,接收者之间根据接到消息的时间进行同步,如 RBS、adaptive RBS 等。

(4) 定位

WSNs 采集的数据往往需要与位置信息相结合才有意义。由于 WSNs 具有低功耗、自组织和通信距离有限等特点,传统的 GPS 等算法不再适合 WSNs。WSNs 中需要定位的节点称为未知节点,而己知自身位置并协助未知节点定位的节点称为锚节点(anchor node)。WSNs 的定位就是未知节点通过定位技术获得自身位置信息的过程。在 WSNs 定位中,通常使用三边测量法、三角测量法和极大似然估计法等算法计算节点位置。WSNs 中的定位技术可以从以下不同角度分类:

①基于测距的(range-based)定位技术和不基于测距的(range-free)定位技术

基于测距的定位技术需要测量相邻节点间的绝对距离或方位来计算未知节点的位置,包括信号强度测距法、到达时间差(TDOA)测距法、时间差定位法和到达角(AOA)定位法等。该类技术需要设计算法来减小测距误差对定位的影响,包括多次测量、循环定位求精等。虽然这类算法可以获得相对精确的定位结果,但是其计算和通信消耗却较大,不适合

WSNs 低功耗的特点。不基于测距的定位技术利用节点间的估计距离计算节点位置,包括质心定位算法、凸规划定位算法、基于距离矢量计算跳数的算法(DV-Hop)、无定形(A-morphous)算法和以三角形内的点近似定位(APIT)算法等。不基于测距的技术虽然精度较低,但是对大多数应用已经足够,因为其拥有造价低、低功耗的显著优势,所以在 WSNs 中备受关注。

②基于锚节点的定位技术和无锚节点的定位技术

基于锚节点的定位技术在定位过程中,以锚节点作为参考点,各节点定位后产生整体的绝对坐标系。无锚节点的定位技术只关心节点间的相对位置,在定位过程中各节点先以自身作为参考点,将邻近的节点纳入自己定义的坐标系中,相邻的坐标系依次转换合并,最后产生整体相对坐标系。

③粗粒度定位技术和细粒度定位技术

根据计算所需信息的力度划分。细粒度定位计算所需的信息包括信号强度、时间等,而基于跳数和与锚节点的接近度来度量的,则是粗粒度定位。

2.2 WSNs 应用支撑技术

(1) 数据存储

数据存储根据数据采集地点与数据存储地点的特点,可以分为本地存储(存储到节点本地)、外地存储(存储到汇聚节点)和以数据为中心存储(存储到数据对应节点)几种。本地存储与外地存储思路自然。以数据为中心的存储借鉴了 DHT 的思路,通过散列函数将要存储或查询的数据映射到对应位置的节点。具体到每种数据存储方法时,为了查询及存储的便捷、避免失效节点带来的数据损失,往往采取特定的冗余策略。如常见的结构复制法,就是将数据采集区域分为 n 层视图,第 i 层视图将区域分为 4^i 个区块。数据在 0 层视图通过哈希函数映射到某节点位置(称为主节点)。在 1 层视图中,除了主节点所在的区块,其它三个区块中对应位置的节点成为主节点的子节点,以此类推。存储时,采集节点将数据发送到离自己最近的映像节点处,不必都发送到主节点;查询数据的时候,需要对所有映像节点发出查询请求。DIMENSIONS 提出了一种适合平均值存储的策略,层次与区块的划分与结构复制法类似,每层视图的各区块有簇头节点,负责自己区块的平均温度。DIFS 层次与区块的划分与 DIMENSIONS 一致,第 $n-1$ 层的每个区块只有一个存储节点,负责存储自己区块内节点的所有采集数据。假设每个存储节点在上一层有 2 个父节点,以此类推,第 0 层有 2^{n-1} 个根节点,每个根节点负责存储区域内所有节点某一范围的数据。

(2) 目标识别与跟踪

目标识别与跟踪是 WSNs 的主要应用支持技术,其中涉及到图像处理、声音信号识别等许多外围技术。这里只讨论 WSNs 特性相关的部分。目标识别与跟踪首先涉及到覆盖问题,与部署相关。具体来讲就是传感器是否可以覆盖目标所在区域,进一步地是否以最小节点数覆盖目标所在区域。这里说的目标分为离散目标和连续目标(化学液体、气体等)。

目标识别与跟踪,包括目标发现、目标分类、目标估计、位置预测等方面,与定位技术紧密相连。发现目标后,对目标进行分类,估算目标位置,将相关信息传回。在跟踪的过程中,可以进行位置预测来使非相关区域的节点睡眠。当目标移动时,还需要更新位置数据。实际应用中的目标跟踪,往往是多目标跟踪。目标跟踪可以分为以下几类:

①直接跟踪方式。所有节点都随时处于检测状态,没有

节点睡眠,监测到目标,直接通知基站。这种方式虽然实时性好,但无论在能耗还是扩展性上都是最差的一种。

②基于树的跟踪。可以分为静态树和动态树,其中后者是指随目标移动预测下一步位置,动态改变树的结构。这种跟踪方式的数据可以在中间结点融合,但建树和路由计算消耗很大。

③基于簇的跟踪。与基于树的跟踪类似,但是一般假设簇头节点直接与基站相连,扩展性不好。

④基于预测的跟踪。在基于树或者簇的跟踪模型的基础上,加上预测模型。这种跟踪方式有基础模型的固有缺陷,但是更加有效,不过增加了计算。

⑤边界监测法。首先构造可以覆盖整个区域的节点列表,其余的节点关闭。将边界节点的传感器和通信部件打开,内部节点的通信部件打开。当目标从外界进入时,边界节点可以 sense,然后通过内部节点将信息转发至 sink。

(3)数据融合

作为一种有效降低能耗和控制拥塞的方法,数据融合在 WSNs 中被广泛关注。除了可以减少冗余信息之外,数据融合还可以在大量采集信息的基础上提供相对准确的数据,对于低可靠性的 WSNs 来说也十分重要。由于资源限制,现有的数据融合一般只采用简单的融合函数(SUM、COUNT、AVG、MIN、MAX等),或者在路由中采取简单的手段控制信息冗余(如 DD 路由过程中发现冗余信息则抛弃)。

数据融合主要有两类:一类是应用相关的数据融合(ADDA, Application Dependent Data Aggregation),一类是非应用相关的数据融合(AIDA, Application Independent Data Aggregation)。应用相关的数据融合,根据应用相关信息减少数据冗余。这种数据融合中,网络层与应用层紧密结合,路由决策受融合目标的影响。ADDA 主要有以下几种方法:以最近的数据源为中心,数据在距离目的地最近的源节点处融合;最短路径树 SPT,数据沿着源节点到目标节点的最短路径传递,在路径中间的节点进行数据融合;贪心树 GIT 把数据的传输路径融合成树。直接扩散(DD)就是一种典型的 ADDA,根据应用相关的数据进行路由,并在加强路径中进行数据融合。LEACH 通过簇进行应用层的数据融合。其它的许多数据融合架构也提供网络层、传输层和应用层的数据融合。而 AIDA 则没有这种跨层的依赖性,这样可以在各种应用中用同一套融合架构。如可以将发往同一目标节点的数据连接起来,用一个包头发送。

(4)安全相关技术

WSNs 常常会被部署在无保护的场所,甚至部署在战场上,极易受到各种形式的攻击。针对 WSNs 的攻击问题,总的来说可以分为内外两类:外部攻击,指各类来自非网络成员的攻击行为,包括物理破坏、入侵节点及外部设备冒充基站等;内部攻击,指来自网络成员中被俘获节点或基站的攻击行为。

WSNs 中存在众多的攻击方式:拒绝服务攻击,可以由通过物理层的信号干扰、链路层(CSMA)的碰撞、网络层的拒绝转发篡改、传输层的大量连接请求等,在通信栈的各层中实现拒绝服务攻击;Sybil 攻击是指恶意节点冒充多个身份,对分布式数据存储、路由、数据融合等都会造成影响;在 WSNs 中,基站、汇聚节点以及基站周边的节点都有大量的信息流,而且作用极其重要。可以通过流量分析找到这些节点并加以破坏、冒充;还有隐私攻击,WSNs 的应用使人们获得了更多

的方便,同时也给人们带来了隐私安全问题,因为 WSNs 使得大量的远程获得信息变得更容易。针对 WSNs 的隐私安全,现在的研究还不充分,需要首先明确 WSNs 中隐私的定义。此外,WSNs 的特定攻击还有 sinkhole(伪装自己到基站的路由最佳)、wormhole(使两个远距离节点相信互为邻居)、Hello Flood(通过向每个节点发送 hello 伪装成一跳之内的邻居)、Acknowledgement Spoofing(伪装失效或者低能力节点向发送者返回 ACK)等。

针对上述各种攻击,必须利用有效的防御措施加以防范。其中最主要的就是加密机制,密钥管理是 WSNs 安全中的研究热点之一;此外还有针对各类 DoS 的防范、安全广播和多播等。针对 WSNs 中的 Sybil 攻击,采用各种方式使节点不能伪造身份信息,如可以通过为成员节点随机分配专有信道,将成员 ID 与信道绑定,伪装不同 ID 必须知道专有信道而且可以在多个信道上发送信息。当然最直接有效的方式还是利用加密机制进行身份鉴别。抵抗流量分析攻击,可以用随机漫步(random walk),即节点偶尔会用父节点之外的节点进行路由,这样就不会有明显的传输路径。还可以间或产生伪装包,发往任意节点,设置 TTL 以防伪装包的转发耗费过多能量。

安全的数据融合也是 WSNs 安全中需要研究的一个方面。WSN 中安全的数据融合主要有两个功能:一是获得更贴近事实的更为准确的数据;二是发现及丢弃被攻陷节点发送的包含篡改信息的数据包。当前,WSN 中的数据融合主要有两种方式:一种是节点把原始数据传送到基站,在基站进行数据融合;一种是融合节点(aggregator)先在本地收集周边节点的信息进行融合,然后再传送给基站,进行最终的数据融合,融合节点可以多重级联。其中后一种数据融合机制通常与路由协议相联系,以减少网络中的通信负载,但是会使安全问题更加复杂——中间的融合节点本身有可能篡改、伪造或者丢弃信息,也可能转发错误的信息;加解密算法也变得更为复杂,因为中间节点必须能够理解传送过来的数据才能够进行有效的数据融合,所以需要结合安全路由协议的研究以及密钥管理问题的研究来进行带有网内数据融合的安全的数据融合方法的研究。但是这种做法还是当前数据融合的主流。有的路由协议为了保证协议的安全性而禁止数据融合,这种做法不应推荐。被攻陷节点发送的错误信息的识别,可以与被攻陷节点的发现相结合,建立节点间的信任体系^[22,23],通过计算节点的信誉度对其发送信息进行加权计算。信誉度低的节点发送的信息在融合时所起的作用小,被认为是被攻陷节点发送的信息,可以直接丢弃。

WSNs 路由协议的研究是 WSN 研究的重点,安全路由协议的目标就是提供路由功能的可用性,即维持节点之间的通信链路畅通。在这个广义的定义中,可靠性也成为路由安全的一个方面。当前在 WSN 路由安全领域的研究主要集中在两大方面:一是根据 WSNs 的特点针对已知的 WSNs 及 ad hoc 路由协议建立攻击模型,以改进已知 WSNs 路由协议的安全性或者改进已知 ad hoc 路由协议的性能,以适应 WSNs;另一方面是由设计开始创建新的适合于 WSNs 的安全路由协议。虽然在 ad hoc 网络中安全路由问题已经得到了一定程度的解决,如基于 DSR(Dynamic Source Routing protocol)及 TESLA 协议的 Ariadne,但是 WSNs 需要更轻量级的协议。不过 WSNs 轻量级的路由协议,也同时成为其安全脆弱性的一个主要原因。Chris Karlof 与 David Wagner 通过

sinkholes 和 HELLO floods 攻击对当前几个著名的 WSNs 路由协议的安全性进行了分析,发现通过被攻陷节点,利用丢包或者选择性转发就可以对路由协议进行简单的攻击^[24]。另外,基于优先级的路由选择^[25,26],即根据不同的安全需求级别对传输数据的优先级进行设置,以作为路由选择的依据,也是 WSN 安全路由中一项重要技术。

结论 WSNs 的出现,使得许多应用成为可能,同时也为现有的诸多应用提供了更好的解决途径。但是,虽然 WSNs 的应用前景广阔,与其它网络形式相比,WSNs 目前并没有得到充分的应用,其应用范围还需要进一步拓展。从 WSNs 的应用综述可以看出,单一学科的技术不足以支撑这些应用。作为一个多学科交叉领域,WSNs 的支撑技术涉及范围广,且各项技术之间需要紧密协作。但是 WSNs 由于其自身具有低功耗、低成本、自组织、大规模、传输距离有限等特点,其技术实现受到了很大程度的限制,需要在低成本的节点内针对应用的主要指标,实现所有必需的支撑技术,以往较为成熟的技术都需要改造或者重新设计。总之,WSNs 需要一整套特定的从硬件到软件、从节点到网络、从基础研究到高层应用的全方位解决方案,这也为 WSNs 的研究提供了广阔的空间。

参 考 文 献

- 1 He T, Krishnamurthy S, et al. An energy-efficient surveillance system using wireless sensor networks. MobiSys'04, Boston, MA, 2004
- 2 Sinopoli B, Sharp C, et al. Distributed control applications within sensor networks. In: Proc. of the IEEE, August 2003
- 3 Mainwaring A, Polastre J, et al. Wireless sensor networks for habitat monitoring. In: ACM Inter Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications (WSNA'02), Atlanta, GA, 2002
- 4 Knot T. BP Frontiers Magazine. April 2004(9):6~10. [ACCE] http://www.accenture.com/xd/xd.asp?it=enweb&xd=services\technology\case\tech_telematics_trucks.xml
- 5 http://bwrc.eecs.berkeley.edu/Seminars/Wright%20-%202011.22.02/P%20Wright%20SABER_SEMINAR_OCTOBER2002.ppt#1
- 6 Blomqvist E, Koivo H N. Security in Sensor Networks - A Case Study. In: 12th Med Conf on Control and Automation MED'04 (IEEE), Kusadasi, Turkey, 2004
- 7 Schwiebert L, Gupta S K S, et al. Research challenges in wireless networks of biomedical sensors. In: Mobile Computing and Networking, 2001. 151~165
- 8 Demirkol I, Ersoy C, et al. MAC Protocols for Wireless Sensor Networks; a Survey
- 9 zhong L C, Shah R, et al. An Ultra-low Power and Distributed Access Protocol for Broadband Wireless Sensor Networks. In: IEEE Broadband Wireless Summit, Las Vegas, May 2001
- 10 Woo A, Culler D E. A transmission control scheme for media access in sensor networks. In: Proceeding of the Seventh Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. Rome, Italy, July 2001. 221~235
- 11 Stein G, Kabitzsch K. A Radio Protocol for Low Power Wireless Sensor Networks. In: Proceedings of the 5th IFAC Conference on Fieldbus Systems and Their Applications FET2003. Aveiro, Portugal, July 2003. 53~58
- 12 Lu C, Blum B M, et al. RAP: A Real-Time Communication Architecture for Large-Scale Wireless Sensor Networks. In: IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium (RTAS 2002), San Jose, California, September 2002. 55~66
- 13 Ding J, Sivalingam K, et al. A multi-layered architecture and protocols for large-scale wireless sensor networks. In: Vehicular Technology Conference. VTC 2003-Fall. 2003 IEEE 58th, 2003, 3:1443~1447
- 14 Cui S, Madan R, et al. Joint Routing, MAC, and Link Layer Optimization in Sensor Networks with Energy Constraints. In: ICC'05, Korea, May 2005
- 15 Rugin R, Mazzini G. A simple and efficient MAC-routing integrated algorithm for sensor network. In: IEEE International Conference on Communications, 2004, 6:3499~3503
- 16 Safwat A, Hassanein H, et al. ECPS and E2LA: new paradigms for energy efficiency in wireless ad hoc and sensor networks. In: IEEE Global Telecommunications Conference, GLOBECOM '03, 2003, 6 :3547~3552
- 17 Zorzi M. A new contention-based MAC protocol for geographic forwarding in ad hoc and sensor networks. In: IEEE International Conference on Communications, 2004, 6:3481~3485
- 18 Enz C C, El-Hoiydi A, et al. WiseNET: An Ultralow-Power Wireless Sensor Network Solution. IEEE Computer, 2004
- 19 Sprinkler V N. A Reliable and Energy Efficient Data Dissemination Service for Wireless Embedded Device. In: Proceedings of The 26th IEEE Real-Time Systems Symposium for Real-Time Communication and Sensor Network Track, 2005
- 20 Wang C, Sohray , Li B. SenTCP: A hop-by-hop congestion control protocol for wireless sensor networks. In: Proceedings of IEEE INFOCOM 2005 (Poster Paper), Miami, Florida, USA, Mar. 2005
- 21 Hill J L. System Architecture for Wireless Sensor Networks, [Dissertation for Doctoral Degree]. Spring: U C Berkeley, 2003
- 22 Crosby G V, Pissinou N, et al. A Framework for Trust-based Cluster Head Election in Wireless Sensor Networks. In: Proceedings of the Second IEEE Workshop on Dependability and Security in Sensor Networks and Systems (DSSNS'06)
- 23 Shaikh R A, Jameel H, et al. Trust Management Problem in Distributed Wireless Sensor Networks. In: Proceedings of the 12th IEEE International Conference on Embedded and Real-Time Computing Systems and Applications (RTCSA'06)
- 24 Karlof C, Wagner D. Secure Routing in Wireless Sensor Networks: Attacks and Countermeasures. In: Proc. 1st IEEE Int'l Wksp Sensor Network Protocols and Applications, May 2003
- 25 Bhatnagar S, Deb B, et al. Service Differentiation in Sensor Networks. In: Proc. of Wireless Personal Multimedia Communications, 2001
- 26 Deb B, Bhatnagar S, et al. ReInForM: Reliable Information Forwarding Using Multiple Paths in Sensor Networks. In: Proc. 28th Annual IEEE Int'l Conf. Local Computer Networks (LCN 2003), Oct. 2003