

面向物联网的无线传感器网络综述

钱志鸿^{*①} 王义君^②

^①(吉林大学通信工程学院 长春 130012)

^②(长春理工大学电子信息工程学院 长春 130022)

摘要: 在分析无线传感器网络国内外研究现状及技术成熟度的基础上,从技术层面阐述了无线传感器网络与物联网之间的相互关系,总结了无线传感器网络系统执行所需要的信息采集系统设计、网络服务支持和网络通信协议设计等关键技术,说明了无线传感器网络未来发展所面临的挑战,并提出了面向物联网的无线传感器网络发展新思路。

关键词: 无线传感器网络; 物联网; 信息采集系统; 网络服务支持; 网络通信协议

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2013)01-0215-13

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2012.00876

Internet of Things-oriented Wireless Sensor Networks Review

Qian Zhi-hong^① Wang Yi-jun^②

^①(College of Communication Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China)

^②(School of Electronic & Information Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: Based on analyzing overseas and domestic research status and technology readiness levels of wireless sensor networks (WSNs), the correlation between WSNs and Internet of Things (IoT) is described from a technical point. Key technologies required for WSNs implement, which include information acquisition system design, network services support and network communication protocol, are discussed in this paper. Development conceptions of future WSNs are presented based on summarizing challenges that WSNs must be solved.

Key words: Wireless Sensor Networks (WSNs); Internet of Things (IoT); Information acquisition system; Network services support; Network communication protocol

1 引言

无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSNs)是由部署在监测区域内大量传感器节点相互通信形成的多跳自组织网络系统,是物联网底层网络的重要技术形式^[1]。随着无线通信、传感器技术、嵌入式应用和微电子技术的日趋成熟,WSNs可以在任何时间、任何地点、任何环境条件下获取人们所需信息,为物联网(Internet of Things, IoT)的发展奠定基础。由于WSNs具有自组织、部署迅捷、高容错性和强隐蔽性等技术优势,因此非常适用于战场目标定位^[2]、生理数据收集^[3]、智能交通系统^[4]和海洋探测^[5]等众多领域。

随着面向物联网的WSNs技术再一次拓展和创新,国内外学术及工业界人士对于WSNs的研究从局部WSNs感知逐步扩展到广域物物互联阶段。关

于WSNs的组织和会议方面,ACM于2005年创刊的刊物(ACM Transaction on Sensor Network),用来刊登WSNs技术的最新研究成果。每年举行一次的关于WSNs方面的学术会议EWSN(European Conference on Wireless Sensor Networks),在欧洲被公认为是WSNs方向的顶级学术交流平台。2006年10月,中国计算机学会传感器网络专委会宣布成立,该委员会是一个非商业性的、产学研结合的学术机构;是全国范围内学术沟通、合作交流以及吸引企业参与并加速传感器网络产业化进程的良好平台。关于WSNs的科学研究方面,加州大学洛杉矶分校(University of California, Los Angeles)的ASCENT(Actuated Sensing & Coordinated Embedded Networked Technologies)实验室,加州大学伯克利分校的CITRIS(Center for Information Technology Research in the Interest of Society),麻省理工学院(Massachusetts Institute of Technology),IBM, Crossbow Technology公司等众多美国高校及知名企业对WSNs技术提出了有效的

2012-07-09 收到, 2012-10-22 改回

国家自然科学基金(61071073)和教育部高等学校博士学科点专项科研基金(20090061110043)资助课题

*通信作者: 钱志鸿 dr.qzh@163.com

解决方案,同时,美国政府大力推进基于 WSNs 的家庭智能能源系统。到 2020 年,60% 的美国家庭有望安装智能能源管理系统,预计能源开销最高可减低 20%;2011 年,日本政府重新启动了大地震后一度搁置的政府 ICT(Information and Communication Technology)战略,该战略是对 2009 年提出的“i-Japan”战略的再一次升级,致力于大数据应用所需的云计算,WSNs,社会化媒体等智能技术开发,根据日本野村综合研究所的分析显示,日本大数据应用带来的经济效益将超过 2500 亿美元。与此同时,西班牙、法国、德国、新加坡等国家也在加紧部署与 WSNs 相关的发展战略,逐步推进 WSNs 网络基础设施的建设。目前,我国的 WSNs 技术及产业链仍处于发展初期,中国科学院软件研究所无线自组织网络研究小组、中国科学院计算技术研究所传感器网络实验室、无锡物联网产业研究院、上海市计算技术研究所、清华大学仪器科学与技术研究所在 WSNs 理论及应用方面做了深入的研究和探索,“国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006-2020 年)”也将“传感器网络及智能信息处理”作为“重点领域及其优先主题”给予政策上的支持,对于 WSNs 技术构架和产业模式的形成都具有巨大的推动作用^[6]。

本文在系统研究和调研的基础上,从技术层面阐述了 WSNs 与物联网的相互关系,探讨了 WSNs 系统执行所需要的关键支撑技术,总结了 WSNs 所面临的挑战,提出了面向物联网的 WSNs 发展新思路。

2 WSNs 与 IoT

文献[7]提出的物联网系统架构如图 1 所示,包括底层网络分布、汇聚网关接入、互联网络融合以及终端用户应用 4 个部分。

在图 1 中,大量的底层网络系统选择性地分布于物理空间当中,根据各自特点通过相应方式构成网络分布。底层网络通过 RFID(Radio Frequency Identification),WSNs,无线局域网等网络技术采集物物交换信息并传输到智能汇聚网关^[8],通过智能汇聚网关接入到网络融合体系,最后利用包括广播电视网、互联网、电信网等网络途径使信息到达终端用户应用系统。与此同时,终端用户可以通过主观行为影响底层网络面向不同应用,从而实现人与物、物与物、物与人之间的物联信息交互^[9]。

如图 2 所示,通过定义如下 3 个抽象概念,可以进一步说明包括 WSNs 在内的底层网络在物联网中的作用。

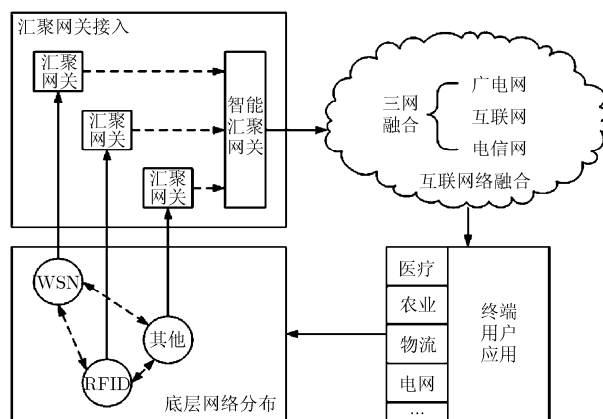


图 1 物联网系统架构

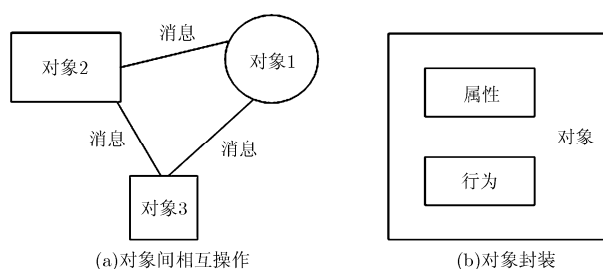


图 2 对象关系示意图

(1)对象:客观世界中任何一个事物都可以看成一个对象,数以万计的对象证明了客观世界的存在。每个对象都具有两个特点:属性和行为,属性描述了对象的静态特征,行为描述了对象的动态特征。任何一个对象往往是由一组属性和一组行为构成的。

(2)消息:客观世界向对象发出的一个信息。消息的存在说明对象可以对客观世界的外部刺激作出反应。各个对象间可以通过消息进行信息的传递和交流。

(3)封装:将有关的属性和行为集成在一个对象当中,形成一个基本单位。

物联网的重要特点之一就是使物体与物体之间实现信息交换,每个物体都是一个对象。因此负责感知和记录信息的物联网底层网络必须能够反映每个对象的特点。

首先,RFID 技术^[10]利用无线射频信号识别目标对象并读取该对象的相关信息,这些信息反映了对象的自身特点,描述了对象的静态特征。其次,除了标识物体的静态特征,对于物联网中的每个对象来说,探测它们的物理状态的改变能力,记录它们在环境中动态特征都是需要考虑的。就这方面而言,WSNs 在缩小物理和虚拟世界之间的差距方面扮演了重要角色,它描述了物体的动态特征。WSNs

网络体系结构如图 3 所示。数量巨大的传感器节点以随机散播或者人工放置的方式部署在监测区域中，通过自组织方式构建网络^[11]。由传感器节点监测到的区域内数据经过网络内节点的多跳路由传输最终到达汇聚节点，数据有可能在传输过程中被多个节点执行融合和压缩，最后通过卫星、互联网或者无线接入服务器达到终端的管理节点。用户可以通过管理节点对 WSNs 进行配置管理、任务发布以及安全控制等反馈式操作^[12,13]。

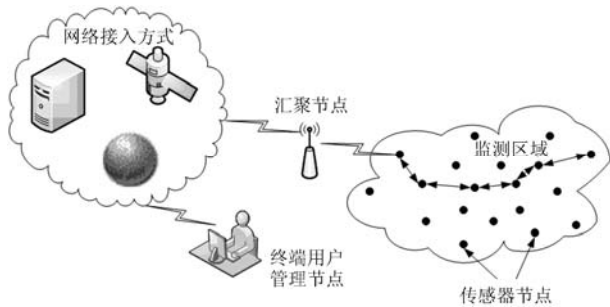


图 3 WSNs 体系结构

3 WSNs 关键技术

WSNs 作为当今信息科学与计算机网络领域的研究热点，其关键技术具有跨学科交叉、多技术融合等特点，每项关键技术都需要亟待突破^[14,15]。WSNs 的关键技术主要体现在 3 个方面，即信息采集系统设计、网络服务支持和网络通信协议设计，如表 1 所示。

表 1 WSNs 关键技术

| 信息采集系统设计 | 网络服务支持 | 网络通信协议设计 |
|-------------|---------|----------|
| WSNs 网络模型设计 | 时间同步机制 | 网络层设计 |
| 系统平台和操作系统 | 网络节点定位 | 数据链路层设计 |
| 节点设计标准化 | 网络拓扑覆盖 | 传输层设计 |
| 数据存储方式 | 数据融合与压缩 | 物理层设计 |
| 测试床设计 | 网络安全机制 | 跨层优化设计 |
| 诊断和调试支持 | | |

3.1 信息采集系统设计

对于一个在 WSNs 中工作的传感器节点来说，有一些重要的系统设计需要利用有效的 WSNs 网络模型、系统平台和操作系统支持等一系列关键技术完成。

(1) WSNs 网络模型 WSNs 模型的建立对于从整体上把握网络面向应用的特点，协调网络结构具有重要意义。因此，WSNs 技术的改进需要一个新的网络模型适用于不同的应用环境，并且可以准确

描述 WSNs 的特性和目标^[16]。

文献[17]分析了 WSNs 建模的一些方法，通常来讲，这些方法具有不同的性质。根据不同的通信功能，数据传输模型和网络动态性将 WSNs 进行分类，宏观描述网络模型建立过程。一个以服务为中心的无线传感器网络模型通过 WSNs 提供面向应用需要的服务，并且把网络当做一个服务提供者^[18]。这种以服务为中心的模型同样只是提供了一个度量 and 表现 WSNs 功能的宏观方法。基于簇树结构的网络建模尽管提供了一个总体和灵活的框架，但是该模型的节点功能是分层的，簇头节点通常会传输大量的数据包，能量消耗明显，在这样的情况下，网络节点的不平等将减低网络的生存周期。而在一些路由协议中采用的模型通常是以数据为中心的^[19]，这样的模型依赖于数据标识和指定的节点位置，因此，不适用于动态且随机分布的 WSNs，并且其收敛性较弱。文献[20]提出了一种基于元胞自动机的 WSNs 建模观点。元胞自动机(Cellular Automata, CA)是一个动态系统，根据一定的局部规则在离散时间域中演变，本质上可以定义为由元胞组成的元胞空间，元胞带有离散和有限的状态^[21,22]，图 4 给出了元胞自动机的组成形式。该方法基本的目标和思想是确保 WSNs 的连续性和有效工作，这样的模型结构不仅仅保证了网内节点的公平性，实现能量的均衡分布，而且保证了动态网络拓扑条件下的强收敛性。同时，元胞自动机模型从微观的角度描述了 WSNs 的特点。

(2) 传感器系统设计其他关键技术分析 目前的 WSNs 模型主要支持大范围的传感器节点布置，但是每个生产厂商的传感器节点产品在无线通信模块、微处理器和存储空间方面不尽相同，对于融合多类型传感器节点到统一的系统平台是一个巨大的挑战，因为不同的节点硬件设计存在差异，而原始

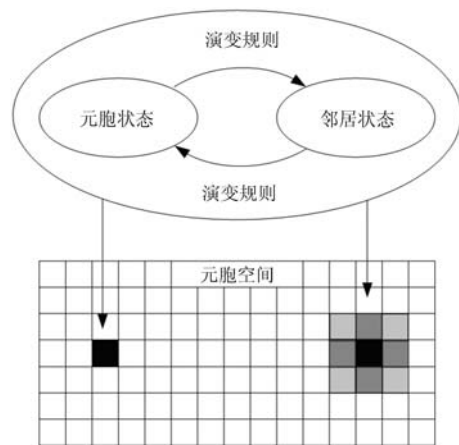


图 4 元胞自动机组成示意图

数据处理对于资源受限的节点来说同样需要解决^[23-25]。WSNs 操作系统必须支持相应的传感器平台, 这样能保证感知数据处理的高效性; WSNs 需要利用低功耗短距离无线通信技术进行数据的发送和接收, 而 IEEE 802.15.4 具有低功耗、低成本的特性, 该标准的许多特征与 WSNs 无线传输要求具有相似之处, 因此, 众多厂商将该技术作为 WSNs 的无线通信平台; 由于传感器节点资源受限, 所以一个有效的存储模型对于满足资源限制和查询需求是十分必要的。目前的 WSNs 数据的存储研究工作集中在网络外部存储、本地存储和以数据为中心的存储 3 个方面^[14,26]。相对于另外两种方式, 以数据为中心的存储方式可以在通信效率和能量消耗等方面取得折中; 最后, 实验测试床的设计对于研究者在真实物理环境中进行 WSNs 实验起到至关重要的作用, 它可以给研究者提供一个验证相关协议、算法和各种网络应用的有效平台^[27,28]。

3.2 网络服务支持

在 WSNs 中, 传感器节点配置、处理和控制在服务用于协调和管理传感器节点, 这些网络服务在能量、任务分布和资源利用方面加强了整个网络的性能^[29-31]。数据管理和控制服务在 WSNs 中扮演了重要角色, 因为它们提供了必要的中间件服务支持, 如时间同步、数据压缩和融合、安全保障、跨层优化等。WSNs 作为一种功能性很强的应用网络, 不仅要完成数据传输, 而且还有对数据进行一系列的融合、压缩和控制, 如何保证任务执行的机密性^[32,33]、数据融合的可靠性以及传输的安全性是 WSNs 的关键技术服务。节点配置可以适时地将诸如能量和带宽等资源进行最有效的分配。节点配置有两个方面的应用, 网络覆盖度和定位^[2,34]。网络的覆盖度需要保证监测区域在高可靠度的前提下被完全覆盖。覆盖度^[35,36]对于 WSNs 来说非常重要, 因为它影响了需要配置的传感器节点的数量、节点的位置、连通性和能量^[37]。位置信息是传感器节点感知数据过程中不可缺少的参量, 缺少位置信息的感知数据通常没有任何意义。确定感知数据节点的位置或者确定事件发生的方位是 WSNs 最基本的关键技术之一。

(1) 时间同步机制 就时间同步技术而言^[38,39], 由于 WSNs 节点受价格和体积的约束, 所以时间同步算法必须考虑能量因素。目前的传统网络时间同步算法通常只专注于最小化同步误差, 而并没有考虑到通信和计算方面的限制。因此, 诸如 GPS (Global Positioning System), NTP (Network Time Protocol) 等现有的时间同步机制并不适用于

WSNs, 需要重新设计新的时间同步机制来满足 WSNs 的网络需求。一般来讲, 在 WSNs 中绝大多数节点都需要通过时间同步算法交换时间同步消息来保证网络时间的同步。在研究 WSNs 时间同步算法时, 需要从扩展性、稳定性、能量有效和鲁棒性等几个方面来综合考虑设计因素, 保证时间最大精度和最小能耗的折中^[40-43]。图 5 显示了 WSNs 中消息传输过程中影响同步精度的关键路径。因此, 时间同步机制作为 WSNs 的一项核心支撑技术, 在多传感器数据融合、节点数据处理、低能耗 MAC 协议的设计^[44,45]、测距定位安全性等方面起着关键作用。

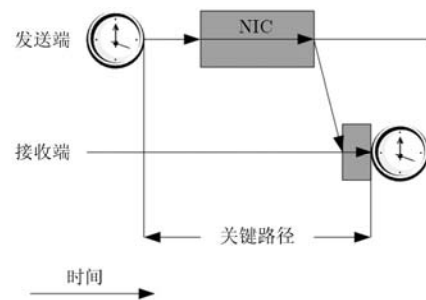


图 5 WSNs 中影响同步精度的关键传输路径

根据同步机制, 可将现有的 WSNs 时间同步算法分为 4 类: (1) 基于接收端-接收端的同步算法, RBS^[46] (Reference Broadcast Synchronization), BTSA^[47] (Bio-inspired Time Synchronization Algorithm) 和 SCTS (Self-Correcting Time Synchronization)^[48] 属于此类同步机制, 其特点是误差来源主要集中在接收节点之间的处理时间, 同步精度较高; (2) 基于发送端-接收端的单向同步算法, FTSP^[49] (Flooding Time Synchronization Protocol) 和 DMTS^[50] (Delay Measurement Time Synchronization) 属于此类同步机制, 其特点是通信量较低, 能量高效, 可实现全网同步; (3) 双向同步算法, TPSN^[51] (Timing-sync Protocol for Sensor Networks) 属于此类同步机制, 其特点是在不能忽略传播时延的应用环境中, 通常采用此类型的同步机制, 但其只能实现相位偏差瞬时同步。(4) 基于多种机制相互融合的时间同步算法, 文献[52]提出的算法属于此类同步机制, 其特点是收敛速度快和能量消耗低, 但是对于较大规模网络同步精度及能耗存在较大的不确定性。

目前绝大多数 WSNs 的相关应用的理论研究都假设系统时钟已经保持同步, 然而在实际应用系统中, 时钟总会存在一定的偏移, 应用效果必然会受到

到影响。RBS 算法利用数据链路层的广播信道特性，接收到同一参考广播的多个节点，通过比较各自接收到信息的本地时间来消除接收端的误差，然而接收节点间的时钟频率漂移、接收节点的数量以及传播过程的不确定性都将产生新的同步误差。而 TPSN 算法对所有节点进行分层处理，每个节点与它的上一级节点同步，使所有节点与根节点达到同步。它的一个明显缺点就是没有考虑根节点的失效问题，新节点加入网络时对整个网络的鲁棒性会造成很大影响。FTSP 算法利用单个广播信息使得发送节点和它相邻的节点达到时间同步，采用同步时间数据线性回归方法估计时间频率漂移和相位偏差，然而 FTSP 采用的估计方法对偏离正常误差范围的数据极其敏感，即使只有一个错误的数据也可能造成估计结果的失真。文献[53]针对当前无线传感器网络时间同步协议普遍存在抗毁能力不足的缺陷，提出了一种基于扩散机制的无线传感器网络时间同步协议，全局时间通过邻居节点间定时随机交换时戳信息维护，取消同步发起节点在同步网络中可能带来的不安全隐患，实现同步网络拓扑最优。同时利用容错、时分等策略进一步提高同步网络的抗毁性能。其基本思想可以理解为一个无声的同步拍手过程，当有人发起拍手活动之后，作为个体而言仅仅通过对周围人群的同步拍手过程观察自动加入到该过程中去，最终实现所有人群同时拍手，这样的方式可以提高网络的鲁棒性，但随着网络节点数量的增加，网络同步收敛时间会急剧增加，网络开销提高明显。FTS(Full-scale Time Synchronization)算法^[54]从整体角度对传感器网络实施逐轮次的推送式的时间同步操作，并通过少量抽样节点的反馈数据计算时间同步操作的有关参数，该算法具有收敛快速、资源高效、同步精度较高和运算复杂度较低的特点，而本算法的不足之处在于没有从数学模型上研究 FTS 算法的时间同步精度，如果能够采用适当的时间同步网络模型会起到更好的效果。REEGF(Geographic Forwarding protocol with Reliable and Energy-Efficient)数据收集协议^[55]使用了具有双无线信道协作通信结构的网络节点，以利用唤醒信道发送和侦听忙音减少节点的空闲侦听时间。利用无线传感器网络的时间同步算法和依赖于本地节点密度、节点剩余能量的概率同步调度算法，REEGF 使处于监测状态的网络节点以概率在每个网络侦听周期同步唤醒，减少冗余节点的空闲侦听，确保网络节点局部连通度的一致性和稳定性；在网络节点处于数据传递状态时，REEGF 依赖于节点的位置信息，采用候选接收节

点竞争的方式，选取朝向目标 Sink 节点前进距离最大的邻节点，作为下一跳中继接收节点，实现路由。MAC 和拓扑管理的有机结合，能够节省节点的资源，均衡节点的能量消耗，保证数据传递的及时性。无论从数据收集进程还是获取节点的位置信息，协议都是对无线传感器网络时间同步算法的有效合理运用。

(2)网络节点定位 定位技术就是帮助人们解决“找东西”的难题，利用信息网络的交互通信告诉用户或者控制中心某一目标的位置信息^[56]。目前，最专业的定位系统是 GPS，它具有全天候、高精度、自动化等显著特点。GPS 功能强大，但需要专门的客户端设备才能使用，不利于民用普及，并且卫星信号无法穿透建筑物，不能满足室内环境应用。所以大量应用场合迫切需要研究者攻克一种新型定位技术代替 GPS。由于 WSNs 定位不同于传统的蜂窝定位和无线局域网定位，具有低功耗、低成本、分布式、自组织、能提供较高的定位精度等优点，成为当前无线定位技术的研究热点。

目前对于 WSNs 定位技术研究主要分为两大类：一种是基于测距(range-based)定位算法，另一种是非测距(range-free)定位算法。相比之下，基于测距定位算法定位精度高，但对网络的硬件设施要求很高，同时在定位过程中要产生大量计算和通信开销。非测距定位算法缺点是定位精度较差，优点是不需要附加硬件支持来实现节点间的距离测量，该定位算法凭借其在成本、功耗方面的优势，受到越来越多的关注。

基于测距的定位算法常用的测距方法有到达角度(Angle Of Arrival, AOA)、到达时间(Time Of Arrival, TOA)、到达时间差(Time Difference Of Arrival, TDOA)及基于信号接收强度估计(Received Signal Strength Indicator, RSSI)。很多研究人员针对这些经典的测距定位算法进行改进及应用。文献[57]对基于测距的定位算法 TDOA、RSSI、AOA 的测量值进行研究，首先是讨论了未知节点周围有足够一跳邻居锚节点时的定位原则，并分析了如何降低测量误差；当未知节点周围没有足够一跳锚节点数目时，提出基于网络的连通度和多跳来实现定位，这种思想与非测距定位算法相似，要想获得网络的连通度和节点之间的跳数，在定位前就需要网络中所有节点进行信息交换，这样会大大增加节点能量的消耗，基于测距的定位算法本身就需要借助无线信号收发设备来测量距离，已经给节点带来很大的能量开销，所以该算法虽然定位精度有所提高，但是以牺牲网络的能耗为代价。

常用的非测距定位算法有质心算法, DV-Hop(Distance Vector-Hop)算法等。非测距定位算法多数处于理论研究阶段, 距离应用还需要不断的改进。文献[58]利用 TDOA 和几种经典的求解双曲线方程组解的定位算法, 得到了网络中待求节点的位置, 作为质心算法的坐标, 并用锚节点与未知节点间的距离作为约束来调整节点的位置, 从而减小定位结果与真实值之间的误差。文献[59]中通过对定位过程中的误差进行分析, 提出了参考点优化选择定理, 表明在室内定位过程中有针对性选择参考点使定位误差最小。文献[60]分析了无线传感器网络定位过程中, 过多的设置锚节点将会增加网络的开销, 从而会带来大量的浪费, 因此为了使用较少的锚节点实现高精度定位, 提出了一种基于 3 个移动锚节点的无需测距的定位算法, 取得了一定的效果, 但是锚节点在不停移动过程中, 需要实时地确定自身的位置, 那么锚节点自身定位精度也将会影响未知节点的定位精度。

(3)网络拓扑覆盖 在 WSNs 中, 网络拓扑控制能力对于整个网络的性能影响非常大。有效的网络拓扑控制结构能够为其他网络服务支持技术提供基础, 提高网络通信协议的应用效率, 同时有利于延长网络的生命周期。WSNs 网络拓扑控制技术在达到网络连通性和覆盖度的要求下, 通过网络内节点选择策略, 避免节点间的冗余通信链路, 从而形成数据转发优化的网络结构。WSNs 拓扑控制方法可以分为两个方面: 层次型拓扑控制和功率控制。层次型拓扑控制采用分簇机制, 选择部分网内节点作为簇头节点, 由簇头节点形成数据处理和转发的传输体系。功率控制机制通过调整网络中节点的发射功率, 在网络保证连通性的前提下, 均衡节点路由邻居节点数量和网络能量消耗。

目前在层次型拓扑控制和功率控制方面, 研究者提出了一系列改进算法^[61-63]。但是现有的算法通常只是针对网络拓扑的某一方面进行了优化和设计, 相关研究缺乏系统性。所以 WSNs 的拓扑控制研究还处于理论研究阶段, 随着相关技术的迅速发展, 拓扑研究的分类区分并不明显, 多种方式的结合往往可以取得良好的效果, 所以通过引入启发式或者计算几何算法等机制, 可以达到降低网络能耗、加速拓扑形成以及提高网络鲁棒性等目的。

(4)数据融合与压缩 为了更好的理解 WSNs 中数据融合与压缩算法的应用特点^[64], 需要首先了解 WSNs 中的数据收集模式: 基于查询的数据收集模式、基于周期汇报的数据收集模式和基于事件汇报的数据收集模式。其中基于查询的数据收集只有

当网络接收到用户端发来的查询指令时才进行数据收集, 并随之将收集结果上报给用户, 通常适用于用户突然对某处监测数据感兴趣的情况或者用户需要了解一段时间内被监测对象的变化趋势等; 基于周期汇报的数据收集是指用户不需要向网络发送查询指令, 网络自动持续收集数据, 并根据预先设定好的汇报周期向用户汇报监测结果的数据收集方式, 通常适用于远距离大范围的监控; 基于事件汇报的数据收集模式是指当被监测区域内有特殊情况发生(如某种数据的监测值超出了设定的阈值)时, 网络主动收集并上报数据的情况, 一般适用于灾难预警等突发状态的汇报。

通过上面分析, 若要在 WSNs 中应用数据融合与压缩算法, 其应用环境应该满足以下两方面的特点:

(a)存在数据冗余 WSNs 要求节点返回的数据应该存在一定的数据冗余。WSNs 数据管理系统可视为一个分布式的数据库, 每个节点分别进行数据的采集与存储。若网络只需查询某一节点某一时刻的监测值, 或只需要返回小区域内很少的数据量, 那么数据融合与压缩就会失去其应有的作用。反之, 若节点需要上报的数据量很大, 或上报区域涉及到多个甚至全网范围的节点, 如用户要查询整个被监测区域一段时间内的数据变化情况或全网节点进行周期性的数据汇报等, 这时信息量迅速膨胀, 传输的海量数据就会给能力受限的节点带来巨大的压力甚至可能造成网络瘫痪。由于数据自身随时间变化的特性以及节点的密集冗余部署等原因, 数据之间存在着很大的冗余, 而应用数据融合与压缩能够有效地消除数据冗余。因此在网络需要收集的数据存在大量冗余信息时应用数据融合与压缩算法, 才能够有效精简信息, 缓解网络通信压力, 延长网络寿命。

(b)允许数据时延 WSNs 数据融合与压缩算法的应用要允许一定的数据时延。只有收集到足够多的数据, 再对其进行处理才具有现实意义。无论是节点基于一段时间内自身监测数据的处理, 还是基于相邻节点间冗余信息的处理, 都需要付出一定的时间开销。因此数据融合与压缩只适用于对时间要求不太高的数据收集模式, 如周期汇报模式。而对于事件汇报的数据收集模式, 如森林火警或地震监测, 由于信息需要及时反馈, 因此并不适用数据压缩算法。

从计算机科学与信息论的角度看, 数据融合与压缩是指在信息不丢失的前提下, 采用一定的技术来减少数据量, 从而达到减少存储空间, 提高数据

的存储、传输与处理效率的方法。在 WSNs 中应用数据融合与压缩，需要能够在保证用户所需的信息量与信息精度的前提下，对网内原始监测数据的冗余性进行处理，以减少传输的数据量。在 WSNs 中应用数据融合与压缩算法有 3 方面作用：

(a)提高传输效率 WSNs 中原始监测数据的信息量非常大，若将这些原始信息不加任何处理的全部传输，无疑会给网络带来巨大的压力，可能会造成信道拥堵甚至网络瘫痪等情况。利用原始数据的相关性对其进行去冗余处理，能够在满足应用精度的前提下使用户获得其感兴趣的信息。数据融合与压缩极大地减少了网络中的数据传输量，能够有效地改善信道拥堵问题，节省传输带宽，提高数据的传输效率。

(b)节省通信能耗 以典型的传感器节点 MicaZ 为例，在供电电压相同的情况下，节点中的处理器模块的工作电流约为 8 mA，而射频收发模块的工作电流却是其两倍多，其中发射模式下的最高电流约为 17.4 mA，而接收模式下的工作电流约为 19.7 mA。由此可见，大多数传感器节点中射频收发模块的功耗通常要高于其他部件的功耗，因此节省通信能耗应为设计 WSNs 中各类通信协议与算法时需要遵循的首要准则。利用数据融合与压缩技术减少网内参与通信的数据，可以有效降低射频收发模块的工作量，从而节省节点的通信能耗。

(c)获取准确信息 WSNs 由于环境差异的影响，获取的信息有时存在着不可靠性，如果只收集少数部分传感器节点的数据通常较难保证获取信息的准确性。因此，必须对同一个监测对象的多个传感器的感知数据进行融合和压缩，才能有效提高感知数据的可信度。与此同时，由于同一区域的传感器节点所获得的感知数据差异不大，如果某一节点所获得的数据超出正常的误差范围，在数据融合和压缩时很容易将其排除。

(5)网络安全机制 WSNs 的安全策略包括安全路由、访问控制、入侵检测、认证以及密钥管理等^[65]。在传统的计算机网络中，主机之间是采用固定网络连接的，采用分层的体系网络体系结构，同时提供了多种网络服务，充分地利用了网络资源，包括命名服务和目录服务等，并在此基础上提出了相关的安全策略，如加密、解密、认证、访问控制、权限管理和防火墙技术等。由于 WSNs 分散连接，每个节点都可以随意移动，节点间通过无线信道连接，节点自身充当路由器，不能提供命名服务、目录服务等网络功能，致使传统网络中的安全机制不再适用于 WSNs 网络。

WSNs 从技术层面上来讲是一门新技术，许多内容仍处于研究和探索阶段。由于 WSNs 的自身特性能够提供随时随地的连接，从而产生了许多新的服务项目和应用领域，同时它也面临着许多新的安全威胁。例如：无线信道使 Ad hoc 网络很容易受到被动窃听、主动入侵、信息阻塞、信息假冒等各种方式的攻击。并且由于节点的能量有限，处理器的计算能力较低，无法实现庞大复杂的加密算法，增加了被窃密的可能性；当节点在野外时，由于缺乏足够的安全保护措施，节点很可能被恶意侵占。因此，恶意攻击除了来自网络自身之外，很有可能来自网络内部。为了获得更高的安全性，WSNs 应该具备分布式安全结构；大型的 WSNs 中包含成百上千个节点，因此安全策略应该具有较好的可扩展性，以满足网络规模日益增大的需求。

3.3 网络通信协议设计

一个可靠并且能量有效协议栈的开发对于支持多类型 WSNs 应用具有重要意义。面向不同的应用，网络内部可能由数百甚至上千的节点组成。每个传感器节点通过协议栈以多跳的形式将信息传递给 Sink 节点。因此，就通信而言，协议栈必须能量有效。目前，WSNs 通信协议栈研究的重点集中在数据链路层、网络层和传输层，以及它们之间的跨层交互^[66,67]。数据链路层通过介质访问控制来构建底层基础结构，控制节点的工作模式。网络层的路由协议决定感知信息的传输路径。传输层确保了源节点和目的节点处数据的可靠性和高效性。

(1)IEEE802.15.4/ZigBee 协议 IEEE802.15.4 致力于一种低速率网络标准的开发，随后 ZigBee 联盟和 IEEE 委员会也加入进来，而 ZigBee 就是这项技术的商业名称。目前，超过 285 家成员公司组成了 ZigBee 联盟，他们正在积极进行 ZigBee 规范的制定和改进工作。ZigBee 联盟是一个高速增长的非盈利业界组织，成员包括国际著名半导体生产商、技术提供者、代工生产商以及最终使用者，主要目的是通过加入无线网络功能，为消费者提供具有更加灵活、更易用的电子产品。自从 2004 年 12 月 ZigBee 联盟推出 ZigBee 1.0 版本规范以来，ZigBee 协议的各种修订版本相继发布，它们始终致力于 ZigBee 网络更加安全可靠、灵活简单、可扩展性更强的规范的修改，使其特点充分发挥。IEEE802.15.4 协议规定了网络的物理层和媒体接入控制层；ZigBee 协议则规定了网络层和应用层。IEEE802.15.4/ZigBee 网络协议具有组网灵活方便、成本低廉、能量消耗低等特点，所以 WSNs 通常采用该网络协议作为其无线通信标准。

IEEE802.15.4/ZigBee 协议的宗旨是在保证数据传输质量的基础上达到较小的功率消耗。虽然协议本身采取了一定的方法来降低能耗,如防碰撞机制、超帧结构、避免冲突的载波检测多路接入技术等,但目前的理论研究成果都已证实现有的协议还没有将其技术的良好性能完全发挥出来,如何尽可能地降低网络能量消耗一直是研究人员追求的目标。

目前对于 IEEE802.15.4 标准物理层的研究还比较薄弱,仅仅停留在物理层的低能耗无线电收发器的设计或者对物理层的软件仿真上,几乎没有协议改进的研究。IEEE802.15.4 媒体接入控制层的研究重点是解决隐藏节点,精确同步,竞争管理、异步唤醒策略等问题。当然,研究的核心是如何节约能量。文献[68]提出了一种简单有效并且耗能少的用于多簇无线传感器网络隐藏节点问题的解决机制。该机制在预先设置好的网络当中把节点分为不存在隐藏节点问题的若干个组,避免了隐藏节点的检测过程,该机制同时也简化了节点的加入过程。针对 IEEE802.15.4 标准中节点在信道接入时造成大量的冗余竞争信息,导致信道的利用率降低,因此文献[69]提出一种自适应的竞争控制策略。该策略采用记忆性的退避方案来检测网络负载并且动态地调整退避窗的大小,以此解决 IEEE802.15.4 中的数据运输效率问题。文献[70]为了解决网络中的能量消耗和冗余,为节点推导出能量消耗模型,以该模型为基础分析了如何通过调节异步唤醒间隔从而减少网络的耗能和延长节点的生存时间。IEEE802.15.4 的研究虽然取得一些进展,但主要还停留在仿真论证阶段,如何在实际改动,并且对网络的性能如能耗,延迟,吞吐量等有较大提高是个需要解决的问题。

目前对于 ZigBee 网络层的研究相对较少,可以说刚刚起步,还没有形成相对成熟的理论体系,已有的研究也只局限于对现有协议的分析和完善,几乎所有的研究也是围绕节约能量展开的。由于目前大部分的研究主要是针对协议自身,内容相对庞杂,所以很难有一个系统的分类。文献[71]提出了短径树路由协议,通过使用 ZigBee 协议中规定的邻居表来减少路由费用,进而减少能量损耗。文献[72]研究了 ZigBee 网络中树路由算法,并提出了基于邻居表的改进树路由算法,即找到源节点和目的节点的公共邻居节点,建立一种邻居节点选择策略。该算法在一定程度上可以解决树路由原有算法不灵活的缺点,节省了地址空间,提高了路由效率。对于 ZigBee 网络层,目前和未来的研究方向主要集中在进一步降低网络能耗,延长网络寿命等路由算法方面。

(2)6LoWPAN 协议 物联网包含如下两层涵义:(a)互联网是物联网的核心和基础,物联网必须在互联网的基础上进行延伸和扩展;(b)终端用户延伸和扩展到了所有物品与物品之间,可以使它们之间进行信息交换和通信。国际电信联盟将射频识别技术、传感器技术、纳米技术、智能嵌入式技术列为物联网的关键技术。当前阶段,物联网所要解决的关键问题之一是底层异构网络与互联网的相互融合。IEEE 802.15.4 通信协议是短距离无线通信标准,更适用于物联网底层异构网络设备间的通信,IPv6 是下一代互联网网络层的主导技术,在地址空间、报文格式、安全性方面具有较大的优势。因此,在 IP 协议的基础上,实现物联网底层异构网络与互联网的相互融合是未来无线网络的主要发展方向^[73-75]。然而,在 6LoWPAN (IPv6 over Low power Wireless Personal Area Networks)技术出现以前,将基于 IEEE 802.15.4 通信协议的 WSNs 与基于 IPv6 协议的互联网相互无缝链接几乎是不可能完成的任务,6LoWPAN 协议结构如图 6 所示。在网络层和数据链路层之间引入的适配层,主要完成接入过程中的以下功能:(a)为了高效传输对 IPv6 数据包进行分片与重组;(b)网络地址自动配置;(c)为了降低 IPv6 开销对 IPv6 分组进行报头压缩;(d)有效路由算法。其中,网络地址自动配置以及 IPv6 报头压缩两类功能,对于识别接入物联网的每个终端节点,使节点间能够相互进行资源共享和信息交换具有最为重要的意义。文献[76]围绕以上两个方面,在 6LoWPAN 适配层的基础上,实现了物联网中基于 IEEE802.15.4 通信协议的底层异构网络与基于 IPv6 协议的互联网的统一寻址,保证了物联网时代网络层向传输层提供灵活简单、无连接、满足 QoS 需求的数据报服务。



图 6 6LoWPAN 协议架构

4 WSNs 面临的挑战

ABI(Allied Business Intelligence) Research 公司分析预测，作为 WSNs 完成数据无线传输的主要短距离无线通信形式，IEEE 802.15.4 集成电路市场出货量在未来将进一步加大，预计 2016 年将超过 8.5 亿美元，标志着从 2010 年到 2016 年经历的复合年均增长率超过 60%。现阶段，面向物联网的 WSNs 还处于研究的探索阶段，在信息采集系统设计、网络服务支持和网络通信协议设计等方面都面临一系列的挑战^[77-79]，如表 2 所示。

5 面向 IoT 的 WSNs 发展新思路

WSNs 作为物联网底层网络的重要组成部分，未来的发展潜力不断加大。如图 7 所示，本文通过研究提出面向 IoT 的 WSNs 发展新思路：

(1) 普适环境下非应用相关的研究趋势 目前，不同的 WSNs 应用背景要求不同的网络服务支持策略以及网络通信协议，对于面向不同应用的 WSNs 开发，研究者更关心 WSNs 的差异性，这也是 WSNs 设计发展到现有阶段区别于传统网络的一个显著特征。然而伴随着无线通信技术、分布式计算、人工智能、嵌入式系统、感知网络以及信息融合等多方面技术的蓬勃发展，物联网技术应运而生。在物联

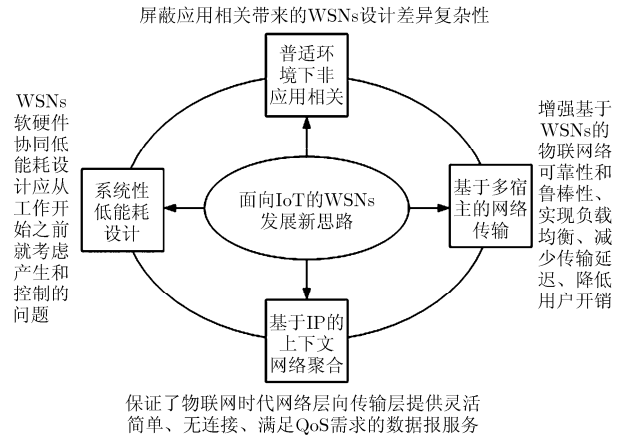


图 7 面向 IoT 的 WSNs 发展新思路

网普适环境模式下，用户能够在任何时间、任何地点、以任何方式进行信息的获取与处理。WSNs 作为感知信息的有效载体，可以充分利用物联网的技术优势，建立统一的满足多种需求的网络通信协议和网络服务支持策略，从而屏蔽应用相关带来的 WSNs 设计差异复杂性。

(2) 系统性低能耗设计研究趋势 低功耗设计属于资源管理的一部分。WSNs 的节点通常体积小，电源携带的能量十分有限，所以如何最大限度地降低能量消耗提高网络生命周期是 WSNs 面临

表 2 无线传感器网络面临的挑战

| | | |
|--------|------|--|
| 信息采集系统 | 平台设计 | 高效的平台设计必须要面临能源效率、成本和应用需求的挑战，需要最优的硬件平台和软件开发。 |
| | 存储结构 | 节能存储数据结构是一个开放的研究领域，它需要在性能和能源效率方面对各种类型的数据库查询进行优化。 |
| | 系统性能 | 面向不同应用系统性能研究为开发工具和解决方案提供有用的信息积累；影响系统性能的主要因素包括网络可伸缩性、网络通信能力、网络协议有效性、网络管理等方面。 |
| 网络服务 | 配置服务 | 配置服务目前大都在能耗、价格和精度上折中考虑，但是由于目前应用差别较大，还需综合考虑节点规模 and 成本来研究不同的配置方案。 |
| | 管理控制 | 针对 WSNs 管理控制的网络鲁棒性研究是解决网络感知数据传输有效性的关键问题。 |
| | 传输层 | 传输层的跨层优化、公平和主动队列管理的拥塞控制是亟待解决的关键问题。 |
| 网络通信协议 | 网络层 | 目前的 WSNs 路由协议通常来讲不是基于地址的，这样的路由策略并不适用于物联网当中，未来的研究热点主要集中在 WSNs 与互联网的无缝连接、路由安全、路由服务质量保证等方面。 |
| | 链路层 | 目前众多数据链路层协议适用于静态传感器节点的性能研究，对于动态网络中的相关协议还需要作进一步改进。 |
| | 物理层 | 未来物理层主要工作是通过低功耗无线电设计，探索超宽带技术并用其来替代现有物理层技术，从而创建简单的调制方案来减少同步和能源成本，制定最佳的传输功率协议与算法。 |
| | 跨层设计 | 各层之间相互协作研究从而降低 WSNs 能量消耗、增强网络性能和延长网络周期是目前亟待解决的问题之一。 |
| 应用 | 应用相关 | WSNs 具有面向应用的特点，不同应用的特征与需求使得 WSNs 硬件平台和软件开发的设计很难统一。 |
| | 商业模式 | 在 WSNs 的推广应用中，商业模式的创新显得尤为重要，没有创新的 WSNs 商业模式很难调动产业链中每个角色的积极性。 |

的最重要的设计挑战。目前的 WSNs 低能耗设计处于一种各自为战的状态, 没有在一个系统研究的基础上进行相关的低能耗设计。区别于传统网络, WSNs 需要软硬件设计的协同合作才能保证将整个网络能量消耗降低到最大限度。所以 WSNs 软硬件协同低能耗设计应从工作开始之前就考虑产生和控制的问题。主要环节为: (a) WSNs 输入/输出的系统能量估计; (b) WSNs 硬件模块及功能性软件模块的系统设计划分; (c) WSNs 器件设计的系统选择。

(3) 基于 IP 的上下文网络聚合发展趋势 WSNs 所处的地理位置和网络环境不尽相同, 其采集和处理的信息和数据存在较大差异。研究者可以利用 IP 技术, 使基于 IEEE 802.15.4 通信协议的 WSNs 与基于 IPv6 协议的互联网的实现统一寻址。通过此技术革新, WSNs 中海量信息和资源在跨层上下文的基础之上可以进行深度挖掘、智能分类及挑选, 从而为终端用户提供更有价值、更有针对性的实用信息。这样的发展趋势保证了物联网时代网络层向传输层提供灵活简单、无连接、满足 QoS 需求的数据报服务。

(4) 基于多宿主的网络传输发展趋势 WSNs 作为物联网底层网络的重要组成部分, 基于多宿主的 WSNs 可以使底层网络采集到的信息通过使用若干条有效链路接入到上层融合网络中, 上层网络同样通过有效的多宿主选择机制可以将指令反馈给 WSNs。多宿主网络传输模型的研究, 具有增强基于 WSNs 的物联网可靠性和鲁棒性、实现负载均衡、减少传输延迟、降低用户开销的实际意义。

6 结束语

21 世纪以来, 伴随着科学技术的再一次跨越式发展, WSNs 技术被众多重要组织和机构预测为可以改变世界的核心科技力量。本文通过系统分析面向物联网的 WSNs, 提出了未来 WSNs 发展的新思路。WSNs 作为物联网底层网络的重要感知技术之一, 在国民安全和国民经济等诸多方面具有广泛的应用前景和社会意义^[80]。WSNs 未来的发展方向将实现地球和外太空综合一体化的信息感知网络, 形成物理世界和虚拟世界的网络接口, 并深入到人们生活领域的各个方面, 从而改变人与自然的交互方式。研究人员应该通过掌握和拥有更多的自主知识产权, 使 WSNs 逐步成为信息时代助推我国经济腾飞的新引擎。WSNs 的快速发展对提高我国在高新技术领域的国际地位, 带动相关产业的全面发展具有重要意义。

参考文献

- [1] Liu Q, Huang X H, and Leng S P. Deployment strategy of wireless sensor networks for Internet of Things[J]. *China Communications*, 2011, 8(8): 111-120.
- [2] Viani F, Rocca P, Oliveri G, et al. Localization, tracking, and imaging of targets in wireless sensor networks: an invited review[J]. *Radio Science*, 2011, DOI: 10.1029/2010RS004561.
- [3] Emeka E E and Abraham O F. A survey of system architecture requirements for health care-based wireless sensor networks[J]. *Sensors*, 2011, 11(5): 4875-4898.
- [4] Fernando L, Antonio-Javier G, Felipe G, et al. A comprehensive approach to WSN-based ITS applications: a survey[J]. *Sensors*, 2011, 11(11): 10220-10265.
- [5] Cristina A, Pedro S, Andrés I, et al. Wireless sensor networks for oceanographic monitoring: a systematic review[J]. *Sensors*, 2010, 10(7): 6948-6968.
- [6] Ni Lione M, Yunhao Liu, and Yanmin Zhu. China's national research project on wireless sensor networks[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2007, 14(6): 78-83.
- [7] 钱志鸿, 王义君. 物联网技术与应用研究[J]. *电子学报*, 2012, 40(5): 1023-1029.
Qian Zhi-hong and Wang Yi-jun. IoT technology and application[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2012, 40(5): 1023-1029.
- [8] López T S, Kim Dae-young, Canepa G H, et al. Integrating wireless sensors and RFID tags into energy-efficient and dynamic context networks[J]. *Computer Journal*, 2009, 52(2): 240-267.
- [9] 孙其博, 刘杰, 黎彝, 等. 物联网: 概念、架构与关键技术研究综述[J]. *北京邮电大学学报*, 2010, 33(3): 1-9.
Sun Qi-bo, Liu Jie, Li Shan, et al. Internet of Things: summarize on concepts, architecture and key technology problem[J]. *Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications*, 2010, 33(3): 1-9.
- [10] 王雪, 钱志鸿, 胡正超, 等. 基于二叉树的 RFID 防碰撞算法的研究[J]. *通信学报*, 2010, 31(6): 49-57.
Wang Xue, Qian Zhi-hong, Hu Zheng-chao, et al. Research on RFID anti-collision algorithms based on binary tree[J]. *Journal on Communications*, 2010, 31(6): 49-57.
- [11] Liao Pei-kai, Chang Min-kuan, and Kuo C J. A statistical approach to contour line estimation in wireless sensor networks with practical considerations[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2009, 58(7): 3579-3595.
- [12] 孙利民, 李建中, 陈俞. 无线传感器网络[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 4-10.
Sun Li-min, Li Jian-zhong, and Chen Yu. *Wireless Sensor Networks*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005: 4-10.
- [13] Akyildiz I F, Tommaso M, and Kaushik R. Wireless multimedia sensor networks: a survey[J]. *IEEE Wireless*

- Communications*, 2007, 14(6): 32–39.
- [14] Simplício M A Jr, Barreto P S L M, Margi C B, *et al.* A survey on key management mechanisms for distributed wireless sensor networks[J]. *Computer Networks*, 2010, 54(15): 2591–2612.
- [15] Niki T and Bhaskar K. Sensor network algorithms and applications[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2012, 370(1958): 5–10.
- [16] 刘林峰, 金杉. 无线传感器网络的拓扑控制算法综述[J]. *计算机科学*, 2008, 35(3): 6–12.
- Liu Lin-feng and Jin Bin. Overview of topology control algorithms in wireless sensor networks[J]. *Computer Science*, 2008, 35(3): 6–12.
- [17] Talik S, Abu N B, and Heinzelman W. A taxonomy of wireless microsensor network models[J]. *ACM SIGMOBILE Mobile. Computing and Communications Review*, 2002, 6(2): 28–36.
- [18] Gracanin D, Eltoweissy M, Wadaa A, *et al.* A service-centric model for wireless sensor networks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2005, 23(6): 1159–1165.
- [19] Yang J, Xu M, Zhao W, *et al.* A multipath routing protocol based on clustering and ant colony optimization for wireless sensor networks[J]. *Sensors*, 2010, 10(5): 4521–4540.
- [20] Wang Yi-jun, Qian Zhi-hong, Sun Da-yang, *et al.* A cellular automata model for wireless sensor networks[C]. *ICONS 2012: The Seventh International Conference on Systems*, Saint Gilles, Reunion Island, Feb. 29–Mar. 5, 2012: 169–174.
- [21] Toffoli T and Margolus N H. *Cellular Automata Machines: A New Environment For Modeling*[M]. Boston: The MIT Press, 1987: 1–45.
- [22] Wolfram S. *A New Kind of Science*[M]. Champaign Illinois: Wolfram Media, 2002.
- [23] Wu Fang-jing, Kao Yu-fen, and Tseng Yu-chee. From wireless sensor networks towards cyber physical systems[J]. *Pervasive and Mobile Computing*, 2011, 7(4): 397–413.
- [24] Riaz N and Mohammad G. An energy-efficient adaptive transmission protocol for ultrawideband wireless sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2009, 58(7): 3647–3660.
- [25] Davis T W, Xu Liang, Miguel N, *et al.* An experimental study of WSN power efficiency: MICAz networks with Xmesh[J]. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2012, DOI: 10.1155/2012/358238.
- [26] 刘志兴, 张菁, 卓力. 基于移动 Agent 的 JPEG2000 分布式编码算法研究[J]. *电子与信息学报*, 2010, 32(9): 2236–2240.
- Liu Zhi-xing, Zhang Jing, and Zhuo Li. Research on distributed JPEG2000 coding algorithm based on mobile agent[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(9): 2236–2240.
- [27] Bai K and Tepedelenioglu C. Distributed detection in UWB wireless sensor networks[C]. *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, Las Vegas, IEEE Press, 2008: 2261–2264.
- [28] Tuncer C A, Student M, and Kenneth E B. Blind decentralized estimation for bandwidth constrained wireless sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2008, 7(5): 1466–1471.
- [29] Abhinav V, David K, and George K. Design and development of a wireless sensor network system for precision agriculture [R]. *Technology Report CMU-RI-TR-10-21*, Robotics Institute, Carnegie Mellon University, 2010.
- [30] Petcharat S, Utz R, Andrew S, *et al.* Dimensioning of time-critical WSNs—theory, implementation and evaluation [J]. *Journal of Communications*, 2011, 6(5): 360–369.
- [31] Habib M A and Sajal K D. Critical density for coverage and connectivity in three-dimensional wireless sensor networks using continuum percolation[J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2009, 20(6): 872–885.
- [32] Wacker A, Knoll M, Heiber T, *et al.* A new approach for establishing pairwise keys for securing wireless sensor networks[C]. *Proceedings of the 3rd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, San Diego, New York: ACM, November 2–4, 2005: 1–12.
- [33] 刘伟, 罗嵘, 杨华中. 一种轻量级的无线传感器网络密钥建立协议[J]. *电子与信息学报*, 2010, 32(4): 869–874.
- Liu Wei, Luo Rong, and Yang Hua-zhong. A lightweight key establishment protocol for wireless sensor networks[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(4): 869–874.
- [34] Habib M A. On the problem of k-coverage in mission-oriented mobile wireless sensor networks[J]. *Computer Networks*, 2012, 56(7): 1935–1950.
- [35] Zhu Chuan, Zheng Chun-lin, Shu Lei, *et al.* A survey on coverage and connectivity issues in wireless sensor networks[J]. *Journal of Network and Computer Applications*, 2012, 35(2): 619–632.
- [36] 李磊, 张宝贤, 黄河清, 等. 无线传感器网络路径覆盖问题研究[J]. *电子与信息学报*, 2010, 32(10): 2429–2433.
- Li Lei, Zhang Bao-xian, Huang He-qing, *et al.* Study on path coverage in wireless sensor networks[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(10): 2429–2433.
- [37] Giuseppe A, Marco C, Mario D F, *et al.* Energy conservation in wireless sensor networks: a survey[J]. *Ad hoc Networks*, 2009, 7(3): 537–568.
- [38] Rhee I, Lee J, and Kim J. Clock synchronization in wireless sensor networks: an overview[J]. *Sensors*, 2009, 9(1): 56–85.

- [39] Kim Dong-sun, Lee, Seung-yerl, Won, Kwang-ho, *et al.* Time-synchronized forwarding protocol for remote control of home appliances based on wireless sensor network[J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2007, 53(4): 1427-1433.
- [40] Faranak H, Julien S, and Frist V. Analysis of a clock synchronization protocol for wireless sensor networks[J]. *Theoretical Computer Science*, 2012, 413(1): 87-105.
- [41] Leng Mei and Wu Yik-chung. On clock synchronization algorithms for wireless sensor networks under unknown delay[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2010, 59(1): 182-190.
- [42] Kim Byoung-kug, Hong Sung-hwa, Hur Kyeong, *et al.* Energy-efficient and rapid time synchronization for wireless sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2010, 56(4): 2258-2266.
- [43] Qasim M C, Erchin S, and Khalid Q. On maximum likelihood estimation of clock offset and skew in networks with exponential delays[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2008, 56(4): 1685-1697.
- [44] 张克旺, 潘煜, 张琼等. e-MAC: 一种面向 Ad hoc 网络的高吞吐量 MAC 协议[J]. 软件学报, 2010, 21(10): 2666-2676.
Zhang Ke-wang, Pan Yu, Zhang Qiong, *et al.* e-MAC: a high throughput MAC protocol for Ad hoc networks[J]. *Journal of Software*, 2010, 21(10): 2666-2676.
- [45] Özgür B A. Performance of transport protocols for multimedia communications in wireless sensor networks[J]. *IEEE Communications Letters*, 2007, 11(10): 826-828.
- [46] Elson J E, Girod L, and Estrin D. Fine-grained network time synchronization using reference broadcasts[C]. Proceedings of the Fifth Symposium on Operating Systems Design and Implementation, Boston, Dec. 9-11, 2002: 147-163.
- [47] Li L, Yang X, and Zhang J Y. A bio-inspired time synchronization algorithm for wireless sensor networks[C]. 2010 International Conference on Computer Engineering and Technology, Chengdu, Apr. 16-18, 2010, 4: 306-311.
- [48] Ren Feng-yuan, Lin Chuang, and Liu Feng. Self-correcting time synchronization using reference broadcast in wireless sensor network[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2008, 15(4): 79-85.
- [49] Maroti M, Kusy B, and Simon G. The flooding time synchronization protocol[C]. Proceedings of the Second International Conference on Embedded Networked Sensor Systems, Baltimore, Nov. 3-5, 2004: 39-49.
- [50] Ping S. Delay measurement time synchronization for wireless sensor networks[R]. Intel Research Berkeley Lab, IRB-TR-03-013, 2003.
- [51] Ganerwal S, Kumar R, and Srivastava M B. Timing-sync protocol for sensor networks[C]. Proceedings of the First ACM Conference on Embedded Networked Sensor System, New York, 2003: 138-149.
- [52] 李立, 刘勇攀, 杨华中, 等. 无线传感器网络分布式一致时间同步协议的收敛分析及加速设计[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(9): 2045-2051.
Li Li, Liu Yong-pan, Yang Hua-zhong, *et al.* Convergence analysis and accelerating design for distributed consensus time synchronization protocol in wireless sensor networks[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(9): 2045-2051.
- [53] 孙德云, 沈杰, 刘海涛. 基于扩散机制的无线传感器网络时间同步协议[J]. 通信学报, 2008, 29(11): 40-49.
Sun De-yun, Shen Jie, and Liu Hai-tao. Diffusion-based time synchronization protocol for wireless sensor networks[J]. *Journal on Communications*, 2008, 29(11): 40-49.
- [54] 皇甫伟, 周新运, 陈灿峰. 基于多层抽样反馈的传感器网络时间同步算法[J]. 通信学报, 2009, 30(3): 59-65.
Huang Pu-wei, Zhou Xin-yun, and Chen Can-feng. Multi-level feedback based time synchronization algorithm for wireless sensor networks[J]. *Journal on Communications*, 2009, 30(3): 59-65.
- [55] 郑国强, 李建东, 周志立. 多跳无线传感器网络的高能效数据收集协议[J]. 软件学报, 2010, 21(9): 2320-2337.
Zheng Guo-qiang, Li Jian-dong, and Zhou Zhi-li. Energy-efficient data gathering protocol for multihop wireless sensor networks[J]. *Journal of Software*, 2010, 21(9): 2320-2337.
- [56] Martuseviius V and Kazanaviius E. Self-localization system for wireless sensor network[J]. *Elektronika Ir Elektrochnika*, 2010, 16(10): 17-20.
- [57] Mao Guo-qiang, Baris F, and Brian D. Wireless sensor network localization techniques[J]. *Computer Networks*, 2007, 51(10): 2529-2553.
- [58] 刘影, 钱志鸿, 王雪, 等. 基于到达时间差的无线传感器网络质心定位算法[J]. 吉林大学学报(工学版), 2010, 40(1): 245-249.
Liu Ying, Qian Zhi-hong, Wang Xue, *et al.* Wireless sensor network centroid localization algorithm based on time difference of arrival[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2010, 40(1): 245-249.
- [59] 刘峰, 张翰, 杨骥. 一种基于加权处理的无线传感器网络平均跳距离估计算法[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(5): 1222-1225.
Liu Feng, Zhang Han, and Yang Ji. An average one-hop distance estimation algorithm based on weighted disposal in wireless sensor network[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2008, 30(5): 1222-1225.
- [60] 史庭俊, 桑霞, 徐立杰, 等. 一种基于信任度的 DV-Hop 改进定位算法[J]. 微电子学与计算机, 2009, 25(10): 100-102.
Shi Ting-jun, Sang Xia, Xu Li-jie, *et al.* An improved localization algorithm for DV-Hop based on trusty degree[J].

- Microelectronics & Computer*, 2009, 25(10): 100–102.
- [61] Sajjad R, Hassaan K Q, Syed A K, *et al.* An energy efficient topology control algorithm for connected area coverage in wireless sensor networks[J]. *Journal of Network and Computer Applications*, 2012, 35(2): 597–605.
- [62] Alper B and Ozgur B A. Communication coverage in wireless passive sensor networks[J]. *IEEE Communications Letters*, 2009, 13(2): 133–135.
- [63] Yuan Tian and Eylem E. Cross-layer collaborative in-network processing in multihop wireless sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2007, 6(3): 297–310.
- [64] Rabindra B and Chang Jae-woo. Privacy-preserving data aggregation protocols for wireless sensor networks: a survey[J]. *Sensors*, 2010, 10(5): 4577–4601.
- [65] Chen Xiang-qian, Makki K, Yen K, *et al.* Sensor network security: a survey[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2009, 11(2): 52–73.
- [66] Lucas D and Joel J. A survey on cross-layer solutions for wireless sensor networks[J]. *Journal of Network and Computer Applications*, 2011, 34(2): 523–534.
- [67] Wang Yun-bo, Vuran M C, and Steve G. Cross-layer analysis of the end-to-end delay distribution in wireless sensor networks[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2012, 20(1): 305–318.
- [68] Koubaa A, Severino R, and Alves M. Improving quality of-service in wireless sensor networks by mitigating “Hidden-Node Collisions”[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2009, 5(3): 299–313.
- [69] Tseng Hsueh-wen, Pang Ai-chun, Chen Jen-hui, *et al.* An adaptive contention control strategy for IEEE 802.15.4-based wireless sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2009, 58(9): 5164–5173.
- [70] Park Tae-rim, Park Kyung-joon, and Lee M J. Design and analysis of asynchronous wakeup for wireless sensor networks [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2009, 8(11): 5530–5541.
- [71] Kim Youn-soo, Lee Eun-ju, Kim Bong-soo, *et al.* Quasi-hierarchical routing algorithm for ZigBee/IEEE 802.15.4 networks[J]. *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, 2008, E91-A(8): 2269–2271.
- [72] 刘丹, 钱志鸿, 刘影. ZigBee 网络树路由改进算法[J]. 吉林大学学报(工学版), 2010, 40(5): 1392–1396.
- Liu Dan, Qian Zhi-hong, and Liu Ying. Tree routing improvement algorithm in ZigBee network[J]. *Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition)*, 2010, 40(5): 1392–1396.
- [73] Cho J, Shim Y, Kwon T, *et al.* SARIF: a novel framework for integrating wireless sensor and RFID networks[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2007, 14(6): 50–56.
- [74] Rodrigues J C, Neves, and Paulo C S. A survey on IP-based wireless sensor network solutions[J]. *International Journal of Communication Systems*, 2010, 23(8): 963–981.
- [75] Dennis A B, Paul M H, and Henk E. Analysis of mobility and sharing of WSNs by IP applications[J]. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2012. DOI: 10.1155/2012/923594.
- [76] 王义君, 钱志鸿, 王雪, 等. 基于 6LoWPAN 的物联网寻址策略研究[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(4): 763–769.
- Wang Yi-jun, Qian Zhi-hong, Wang Xue, *et al.* Addressing scheme for Internet of Things based on IPv6 over Low-power Wireless Personal Area Network (6LoWPAN)[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(4): 763–769.
- [77] Charfi Y, Wakamiya N, and Murata M. Challenging issues in visual sensor networks[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2009, 16(2): 44–49.
- [78] Vehbi C G, Lu Bin, and Gerhard P S. Opportunities and challenges of wireless sensor networks in smart grid[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2010, 57(10): 3557–3564.
- [79] Buttyan L, Gessner D, Hessler A, *et al.* Application of wireless sensor networks in critical infrastructure protection: challenges and design options[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2010, 17(5): 44–49.
- [80] Merrill W. Where is the return on investment in wireless sensor networks[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2010, 17(1): 4–6.
- 钱志鸿：男，1957 年生，教授，博士生导师，主要研究方向为基于蓝牙、ZigBee 等短距离无线通信技术的无线个域网、无线传感器网络、物联网协议构架及关键技术。
- 王义君：男，1984 年生，博士，研究方向为 WSNs 时间同步及路由策略、物联网底层网络接入技术。