

Humboldt University Berlin
Computer Science Department
Systems Architecture Group



Rudower Chaussee 25
D-12489 Berlin-Adlershof
Germany

Phone: +49 30 2093-3400
Fax: +40 30 2093-3112
<http://sar.informatik.hu-berlin.de>

This report is for future publication.
It is for internal distribution only
until 6 month after the date of issue.

无线传感器网络研究新进展
(State of the Art in Wireless Sensor Networks)

HU Berlin Public Report
SAR-PR-2006-07

May 2006

Authors:

李刚, 伊恩斯·彼得·瑞德里希
(Li Gang, Jens Peter Redlich)

无线传感器网络研究新进展

(State of the Art in Wireless Sensor Networks)

李刚^{*}, 伊恩斯·彼得·瑞德里希[†]

(Li Gang, Jens Peter Redlich)

摘要 无线传感器网络是一个微传感器、Ad Hoc无线网络、分布式计算及相关应用领域相交叉的新兴研究方向,在环境监测、军事、农业、医疗、采矿等方面有广阔的应用前景。本文对无线传感器网络的最新研究现状进行了研究,对无线传感器网络的体系结构及主要研究内容进行了分析,提出了其概念体系结构模型,指出了该领域现存的关键问题、今后的研究方向及最新研究动态。

关键词 无线传感器网络,无线传感器网络协议,无线传感器网络操作系统,传感器网络中间件,无线传感器网络仿真 中图法分类号

Abstract Wireless sensor network is a hybrid of micro-sensors, ad hoc wireless network, distributed computing and the technologies of relevant application domains. It has promising applications in many fields, like environment monitoring, traffic and pollution management in urban areas, military, agriculture, medical treatment, mining, and others. This paper presents an overview of the latest research advances in wireless sensor networks, analyzing the wireless sensor network architecture and its main research contents; it also provides a concept architecture model of wireless sensor networks. At last, the key problems of the prior art and of future research directions in this domain are listed, as well as the latest research trends.

Keywords Wireless Sensor Network; Wireless Sensor Network Protocol; Operating System of Wireless Sensor Network; Wireless Sensor Network Middleware; Wireless Sensor Network Simulation.

^{*} 中国科学院计算技术研究所 网格与服务计算研究中心 中国 北京 100080 (Grid and Service Oriented Computing Research Center, Institute of Computing Technology CAS, Beijing 100080, China)

[†] 柏林洪堡大学计算机系 德国 柏林 12489 (Humboldt University, Department of Computer Science, Berlin 12489, Germany)

TABLE OF CONTENTS

(LI GANG, JENS PETER REDLICH)	1
1 引言	3
2 无线传感器网络系统概念体系结构模型	3
3 无线传感器网络的特点与设计原则	4
3.1 特点与挑战	4
3.2 设计原则.....	5
4 主要研究方向	5
4.1 研究现状.....	5
4.2 存在的问题及研究方向	7
4.3 主要研究小组	8
5 研究新动态.....	8
6 结论.....	9

1 引言

无线传感器网络 (Wireless Sensor Network WSN) 是微电子技术、Ad Hoc 无线网络、分布式计算等信息技术发展和融合的产物。它利用低成本、低能耗、可计算的无线传感器网络节点收集、处理用户感兴趣的监测对象的数据,并在此基础上形成满足用户需求的高层应用。由于在军事、环境监测、医疗、农业、采矿等领域有广阔的应用前景,引起了世界各国学术界和工业界的广泛重视,并成为近年来信息科学的一个研究热点。

尽管目前对无线传感器网络的研究已有很多,但对它还没有一个公认的标准定义。有的研究人员认为它是一组通过无线网络连接起来的用于监测某种现象的传感器[1]。有的将它定义为具有计算、通讯和协同能力的传感器节点的集合[2]。有的将它定义成通过无线网络技术组织起来的一组传感器节点,这组传感器节点能够相互协同完成某一具体任务[3]。有的认为它是由一组以 Ad Hoc 方式组织起来的包括传感器的特殊无线网络[4]。有的则从服务角度对它进行了讨论[5]。这些观点或定义主要是从网络基础设施和传感器连接方式的角度对无线传感器网络的含义进行了阐述。但随着研究的进展和应用领域的拓展,人们越来越认识到仅从上述角度定义无线传感器网络是不够的。在本文中,无线传感器网络除了包括通讯基础设施和传感器之外,还包括构筑在两者之上的面向领域的应用,它是一个包括传感器、无线通讯基础设施和相关应用的自组织协同系统。

迄今,已经有一些研究人员从不同角度对无线传感器网络进行了综述。例如:文献[1]对影响无线传感器网络设计的因素、各层网络协议中存在的问题进行了分析;文献[2, 3, 7, 8]对无线传感器网络的主要通讯协议进行了分类和分析比较;文献[6]对无线传感器网络的特征及与通讯基础设施相关的通讯模型、数据传递模型、网络动态模型进行了分析。文献[4,10]对无线传感器网络应用及各层网络协议等的研究进展进行了介绍。

因为无线传感器网络早期研究主要集中在以无线网为基础的网络协议上,这些综述对与基础设施相关的网络协议及其中的问题介绍的较多,对该领域的其它研究(如:无线传感器网络操作系统、中间件及仿真工具等)分析较少。

与已有综述工作不同,本文将总结无线传感器网络的设计原则,给出其概念模型,重点分析无包括无线传感器网络协议、操作系统、中间件、仿真工具等在内的各项研究的最新进展,指出各研究方向存在的主要问题和最新研究动向,以期对该领域的工作有所裨益。

2 无线传感器网络系统概念体系

结构模型

面向应用领域是无线传感器网络的主要特点之一。这使它很难有一个通用的具体参考结构可以遵循[9]。然而,无论是从研究还是应用角度,无线传感器网络都需要一个较高抽象层面的结构模型来指导它的设计。本文在对现有无线传感器网络工作进行分析的基础上,从物理部署、功能结构和逻辑结构三个角度给出了它的概念体系结构模型。

■ 物理部署结构

无线传感器网络在物理部署结构上主要有集中式和自组织式两种结构。在集中式结构中(如图1所示),某传感器网络节点可以作为控制节点对其他节点传递的数据进行聚合,控制其它节点电源的开放与关闭,并可以提供路由等服务。例如:采用 TEEN 协议[11]的传感器网络所具有的层次化簇结构就是一种典型的集中控制结构。在自组织结构中(如图2所示),各传感器网络节点是对等的关系,没有集中控制节点。例如:采用 Rumor Routing[12]组成的网络结构是一种典型的自组织结构。

这两种结构各有特点。集中控制结构能够较好地控制网络中的数据负载,路由及数据传递的效率高,但扩展性差;自组织结构对网络环境变化的适应能力强,对网络动态扩展有更好的支持。

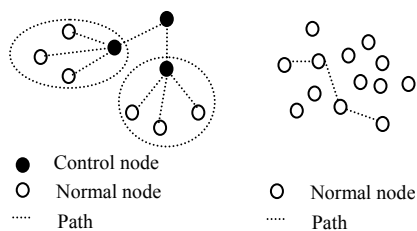


图1 集中控制结构

图2 自组织结构

■ 功能结构

从功能结构视角看,无论无线传感器网络系统采用哪种物理部署结构,它都应该具有以下主要功能。

数据采集与计算:传感器节点具有收集被监测对象数据的能力,并可以对采集到的数据进行预处理,以提高数据传输效率。在一些无线传感器网络中,传感器节点还具有路由计算的能力。

通讯:无线传感器网络按照一定的数据传输模式,将采集到的数据传递到对被监测对象感兴趣的节点的节点。通讯功能通常由无线网络完成。

协同:无线传感器网络中往往存在大量异构传感器,各传感器需要相互协同,完成一个大的感知任务。此外,在对采集到的监测数据的处理上也需要系统的协同支持。

重配置:无线传感器网络在部署之后,受自然环境、能源、用户需求等变化的影响,会需要扩展或重新调整。整个系统应当能够对节点重部署、软件更新、网络拓扑结构变化等提供支持。

安全:系统能够安全、可靠地完成数据的采集、传输、处理和存储。

■ 逻辑结构

尽管不同应用领域的无线传感器网络系统结构不尽相同,但逻辑上都大致包含如图3所示的几部分。

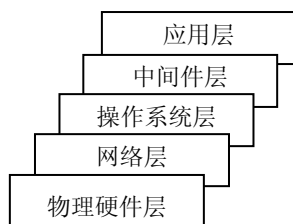


图3 无线传感器网络系统逻辑结构

物理硬件层:包括了与无线传感器网络相关的网络基础设施、传感器等硬件。

网络层:处理传感器节点之间及传感器节点与观察者之间的路由、数据传递等问题。包括了从物理连接到应用的各层无线传感器网络专用协议。

操作系统层:实现物理硬件的抽象,负责管理网络系统资源、传感器节点的内存,实现模块的动态调度、消息管理等。目前,在像 TinyOS[13]这样的一些无线传感器网络操作系统中也包含了通讯协议的实现。

中间件层:封装底层实现细节,提供用户易用的服务接口,包括对监测数据的处理、分析、存储、查询和挖掘接口,并负责协同任务的调度、安全管理,提供面向应用领域的通用服务。除此之外,中间件层还包括与其他类型网络及系统的接口。

应用层:包括了面向应用领域、满足用户需求的特定应用,如:地震预警系统、环境污染监测系统、煤矿瓦斯监测系统、智能家居系统等。

3 无线传感器网络的特点与设计原则

尽管无线传感器网络以无线网络技术为基础,但它们还是有很大的不同。无线传感器网络的特点决定了它独特的设计原则。

3.1 特点与挑战

■ 面向应用领域

无线传感器网络与应用领域密切相关,不同应用领域对数据采集、处理、发布的要求有很大差异,应用领域的环境特点也对系统有很大影响。例如:地震预警系统和环境污染监测系统在网络拓扑结构、通讯模型、数据传递模型等方面都有很大差别。面向应用领域的特点使无线传感器网络的设计必须与应用领域相结合。

■ 能量、计算能力等资源有限

无线传感器网络部署之后,为大量传感器补充新能源比较困难。这一问题在工作人员很难到达的恶劣环境中更加突出。而数据采集、处理、传输及路由计算等都会消耗大量能源。能源的衰减会直接影响整个系统的

寿命。此外,传感器节点在计算、存储能力等方面也有很大限制。

■ 系统动态

无线传感器网络的动态性主要体现在系统本身和被监测对象及用户的变化几方面。首先,无线网络连接本身就有一定不稳定性,由于自然环境、能源等的影响,传感器节点也会出现失效的情况,导致网络拓扑结构等的变化。其次,动态传感器网络中被监测对象本身会发生变化,用户的位置也会发生移动。这些都会给系统的构建、维护带来挑战[2]。

■ 大数据量

无线传感器网络系统中,传感器的数量往往有很多,种类、功能各不相同,采集到的数据数量巨大,并且大多数情况下存在数据冗余,如何高效、低能耗地传输、处理这些数据,为用户提供有用的信息一直是一个极具挑战性的问题。

3.2 设计原则

针对上述特点,综合考虑操作环境、能源消耗、硬件限制、网络拓扑结构等影响因素及其他研究人员的观点[1, 14],在此给出无线传感器网络设计应遵循的主要原则。

■ 低资源消耗

在传感器选择、通讯协议设计、数据传递模式选择时应充分考虑能源消耗的问题,在一些部署环境恶劣的无线传感器网络中这一点显得更为重要。此外,对于网络带宽、传感器节点内存与计算能力也应予以考虑。

■ 适应性

无线传感器网络系统通常在无人看管的情况下工作,在通讯协议、网络拓扑结构、算法等方面应当具有一定的容纳环境及自身变化的能力。能够适应系统动态扩展及由电源枯竭、自然灾害、环境干扰等引起的传感器节点失效等问题[3]。

■ 数据聚合

无线传感器网络关心的往往不是某一个传感器监测到的数据,而是有关某一现象的综合信息。由于通常情况下,传感器数量巨大,监测数据中会包含大量重复、类似数据,采用去重复、求最小值\最大值、求均值等手段或者通过信号处理技术缩减无效

数据,可以提高无线传感器网络的性能[2]。

4 主要研究方向

如前所述,无线传感器网络是一个研究热点,相关工作众多。本文在第2节给出的概念体系结构模型所述逻辑结构的基础上,将无线传感器网络的主要研究进行了分类,归结为传感器/硬件、无线传感器网络协议、无线传感器网络操作系统、无线传感器网络系统中间件、无线传感器网络仿真等几个研究方向。这几个研究方向的现状如下。

4.1 研究现状

■ 传感器/硬件

传感器等硬件设施是无线传感器网络的重要组成部分。该部分研究工作主要包括如何设计高效、节能的新型传感器,如何提高传感器性能,如何设计高效、自适应的无线网络设备等。代表性工作有 Smart Dust、Berkeley Motes、Intel iMote、Berkeley Piconodes、Intel XScale Nodes 等[8]。

■ 无线传感器网络协议

网络协议是无线传感器网络的核心部件之一,用来在网络基础设施和应用两个层面解决无线传感器网络中的数据传递问题。该项研究涉及的内容包括数据传递模型、通讯协议结构、各种专用协议等。无线传感器网络的早期研究主要集中在高效节能的通讯协议上。目前,无线传感器网络协议已有很多,如:泛洪类协议、SPIN、LEACH、DD、CADR、COUGAR、TEEN、MECN、APTEEN、GAF 等[2]。其中,代表性工作如下。

泛洪类协议(包括 Flooding 和 Gossiping 协议),该类协议的基本思想是通过向所有邻居或者部分邻居广播数据,最终使数据传递到接收者。采用这种协议的网络无需维护网络拓扑结构,对拓扑结构变化有一定适应性,在带宽高,网络连接稳定的情况下,有较快的数据传递速度。缺点是 Flooding 协议易产生数据的重复发送,能源消耗大; Gossiping 协议容易产生数据传递的延迟[2]。

SPIN (Sensor Protocols for Information via Negotiation) 协议,由 Joanna Kulik 等人

于 1999 年提出, 其基本思想是通过元数据交换提高有效数据的传递效率, 节省能源。该协议具有节省能源的特点, 但在数据传递的可靠性上存在欠缺, 无法保证数据一定能够正确传递到目的地, 并且存在元数据重复发送的问题[15]。

LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierachy) 协议, 由 Wendi Rabiner Heinzelman 等人于 2000 年提出。这是一种基于簇的单跳路由协议, 采用动态更换簇头的方法均衡各节点的能源消耗, 并用数据聚合降低网络中数据的传输量[16]。该协议在一定条件下能够节省能源。但不能支持部署范围和规模较大的传感器网络, 有时簇动态生成的额外代价较大, 簇头易形成网络可靠性的瓶颈[2]。

DD (Directed Diffusion) 协议, 由 Chalermek Intanagonwiwat 等人于 2000 年提出。这是一种查询驱动的数据传递协议。它首先用数据属性描述数据, 然后通过向邻居节点发送任务广告消息, 建立数据的源和池之间的路径。它能够有针对性地在某个方向上建立路由, 对网络节点失效有一定适应性, 且无需维护网络全局拓扑结构。但该协议中离散的事件驱动数据查询方式不适合需要数据连续传送的应用场景[2, 17]。

GAF (Geographical Adaptive Fidelity) 协议, 由 Ya Xu 等人于 2001 年提出, 该协议建立在虚拟网格基础上, 在同一格段内的网络节点在数据转发上是等价的, 利用等价节点的睡眠可以节省能源, 延长网络寿命[18]。

TEEN (Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network protocol) 协议, 由 Arati Manjeshwar 等人于 2001 年提出。它用簇来组织传感器网络节点, 通过设置硬、软阈值来降低数据传输量, 感知被监测对象的变化。采用该协议的网络能较好地对被监测对象的变化做出反应。但如果被监测数据及变化长时间没有超过阈值, 就会出现整个传感器网络收集不到任何数据的现象, 甚至无法判断传感器网络是否仍能正常工作[11]。

Rumor Routing 协议, 由 David Braginsky 等人于 2002 年提出。它是一种将

查询与事件机制折衷的协议, 其思想是首先建立到每个事件的路径, 当有查询要求时, 先找到事件路径, 然后按照该路径查询[12]。Rumor Routing 协议是对 DD 协议的一种改进, 它减轻了 DD 协议中因查询广播而带来的问题, 但事件数目的多少会影响协议效率[2]。

■ 无线传感器网络操作系统

无线传感器网络操作系统实现对物理资源的抽象, 并管理有限的内存、处理器等资源。迄今, 具有代表性的无线传感器网络操作系统有 TinyOS、SOS、MANTIS OS、Contiki、EYES OS 等。

目前, TinyOS 是实际上的传感器网络节点操作系统标准, 它为面向应用领域的无线传感器网络应用系统的集成提供了一个基于构件的软件框架。该操作系统没有区分用户和内核模式, 没有提供内存保护机制, 但可以在资源有限的条件下, 提供并发处理能力。此外, TinyOS 包括了无线传感器网络通讯协议的实现[13]。

SOS 操作系统主要包括一个通用内核和一个动态装载模块, 实现了消息传递、内存管理、模块装载卸载以及其他一些服务。SOS 没有提供内存保护机制, 但它区分内核和用户模式, 并采用动态内存管理降低编程复杂性和提高临时内存的重用率。此外, 该操作系统还采用优先权调度来处理中断, 提高时间关键任务的性能[19]。

MANTIS OS 是一个支持无线传感器网络快速构建的多线程嵌入式操作系统。它的内核和 API 用标准 C 语言编写, 易于用户使用。在 MANTIS OS 基础上, 应用的开发周期短, 测试、调试方便。此外, 该操作系统还支持多模态原型以及对传感器节点的动态重编程、远程调试[20]。

Contiki 是一个支持程序模块动态调入和替换的无线传感器网络操作系统, 包括核心和可装载程序两部分, 前者包括操作系统内核、基础服务、编程语言运行时环境和支持库, 后者在运行时可以被动态装载或卸载。此外, 该操作系统采用事件驱动的内核, 并以库的方式实现了抢先式多线程, 支持运行在内核之上的基于线程的应用[21]。

EYES OS 是一个具有能源感知能力的小型无线传感器网络操作系统。它支持无线传感器网络动态重配置[22]。

■ 无线传感器网络系统中间件

目前的无线传感器网络系统中间件主要是提供访问传感器的便捷接口,并为无线传感器网络应用的实现、运行和维护提供支持。

迄今这方面的研究主要集中在支持数据管理、软件更新等的中间件上。代表性工作有 Cougar、SINA、Garnet、Impala、NEST、SCADDS 等。

其中, Cougar、SINA 和 Garnet 为数据管理中间件, Cougar 将无线传感器网络看作是一个大型分布式数据库,支持采用类 SQL 语言进行数据查询[23]; SINA 支持对无线传感器网络的监控、数据查询和查询任务分解,并在运行环境之上提供了一个应用编程接口[24]; Garnet 提供了一种以数据流为中心的抽象机制,通过 Receiver、Filtering 和 Dispatching 等服务,支持独立多用户的数据共享[25]。Impala 为无线传感器网络系统的扩展、升级提供了支持[26]。NEST 支持对系统行为的抽象和控制,支持系统的重配置和动态变更[27]。SCADDS 则为无线传感器网络系统在中间件层提供了个可扩展、可协同的结构框架[27]。

■ 无线传感器网络仿真

与 Ad Hoc 无线网络不同,无线传感器网络的一些特性很难通过物理实现的方式进行验证。因此,通过仿真对无线传感器网络进行评价显得十分重要。目前,已有很多研究人员在这方面投入了大量精力。其中,代表性工作有 NS-2、JiST-SWANS、TOSSIM、SensorSim 等。

NS-2 是一个支持有线、无线网络仿真的离散事件模拟器,可以实现 TCP 协议、路由和多播协议等的仿真。NS-2 不是一个无线传感器网络专用的仿真工具,尽管它可以支持无线传感器网络仿真,但是构造仿真系统的代价很高[28]。

JiST-SWANS 是一个用 Java 编写的无线传感器网络仿真工具集,包括一个基于 Java 的离散事件仿真引擎和一个基于该引擎的

可扩展的无线 Ad Hoc 网络仿真器。该工具集采用了软件构件的思想,通过组装配置这些构件可以构造无线传感器网络,并支持大规模网络仿真[29]。

TOSSIM 是一个 TinyOS 环境下的无线传感器网络仿真器。它将 TinyOS 事件驱动的执行映射为离散事件模拟,可以精确地捕捉网络行为,并支持传感器节点的扩展。TOSSIM 与 TinyOS 中的开发工具有良好的接口,用户可以将仿真程序方便地移植到 TinyOS 中[30]。

SensorSim 是一个以 NS-2 为基础构建的传感器网络仿真框架,支持对传感器网络的建模。它对 NS-2 进行了扩展,支持感知通道与传感器模型、电池模型、无线微传感器轻量级协议栈、场景生成和混合仿真[31]。其中,混合仿真是 SensorSim 的一个重要特点。它支持将实际节点加入到仿真中,而且在 SensorSim 的支持下,同一个应用既可以运行在仿真节点上也可以运行在实际节点上,降低了应用移植的开销。

4.2 存在的问题及研究方向

尽管目前对无线传感器网络各方面的研究已经有不少,但其中悬而未决的问题仍然很多。在对现有工作进行分析的基础上,本文在此给出无线传感器网络操作系统、中间件、网络协议和仿真中存在的主要问题及今后的研究方。

由于传感器节点能源、内存等资源十分有限,无线传感器网络操作系统面临着许多传统操作系统未曾遇到的问题。目前,大部分无线传感器网络系统还是直接架构在网络层通讯协议之上,还没有一个独立的操作系统层,这给系统的使用、维护带来了很大的开销。高效、易用的无线传感器网络操作系统的开发仍旧是今后该领域的一个重要研究方向。

对无线传感器网络系统中间件的研究目前尚处在初始阶段,现有工作对通讯协议的支持较多,对应用层面的支持还很弱,许多研究还停留在网络路由算法层面上。此外,现在很多无线传感器网络的研究都建立在仿真之上,在这种情况下构造的中间件实用还有很大距离。在这个研究方向上,无

线传感器网络中间件结构、与 Internet 及其他系统接的接口、支持自适应无线传感器网络应用的中间件等都是值得进一步研究的问题[27]。

迄今,对无线传感器网络协议的研究已有很多。但是,这些工作基本上都集中在对

移植也十分困难。此外,在该方向上对仿真模型、仿真场景自动生成等的研究也很弱。

4.3 主要研究小组

目前,无线传感器网络领域的代表性研究小组及研究内容如表 1 所示。

表 1

研究内容	研究小组	网址
传感器节点及其它硬件	RIML	http://robotics.eecs.berkeley.edu/
	BWRC	http://bwrc.eecs.berkeley.edu/
	BSAC	http://www-bsac.eecs.berkeley.edu/
无线传感器网络协议	NMS	http://nms.lcs.mit.edu/projects/leach/
	CENS	http://research.cens.ucla.edu/
	BWRC	http://bwrc.eecs.berkeley.edu/
无线传感器网络操作系统	CSD-EECS	http://www.tinyos.net/
	NESL	http://nesl.ee.ucla.edu/
	MANTIS	http://mantis.cs.colorado.edu/
	EYES	http://www.eyes.eu.org/
无线传感器网络系统中 中间件	CDG-Cornell	http://www.cs.cornell.edu/database/cougar/
	RTECL	http://www.cs.virginia.edu/~control/
	ISI	http://www.isi.edu/div7/scadds/
无线传感器网络软件开 发环境	LECS	http://lecs.cs.ucla.edu/
	DCG-ETHZ	http://www.dcg.ethz.ch/
无线传感器网络仿真	WNL	http://jist.ece.cornell.edu/
	ISI	http://www.isi.edu/nsnam/ns/
	NESL	http://nesl.ee.ucla.edu/projects/sensorsim/

能源高效协议的研究上,对网络拓扑动态变化、路由修补等考虑的较少,随着无线传感器网络研究和应用的进展,由环境及网络自身的动态变化而引起的适应性问题越来越突出。如何提高无线传感器网络的适应性是一个具有挑战性的问题。此外,目前大部分有关协议的研究都建立在实验经验基础上,理论分析工作相对欠缺[2]。

在无线传感器网络仿真方面,尽管仿真工具已有不少,但是许多仿真工具都是在已有的无线网络仿真工具基础上构造的。由于无线传感器网络有面向应用领域等特点,这些仿真工具在许多方面不能很好地满足无线传感器网络仿真的要求,致使仿真系统构造复杂,代价高,从仿真系统到实际实现的

5 研究新动态

无线传感器网络是一个十分活跃的研究领域,最近也出现了一些新的研究动向,主要体现在面向服务的无线传感器网络应用、无线传感器网络计算和面向无线传感器网络的软件工程几方面。

■ 面向服务的无线传感器网络应用

无线传感器网络具有面向应用领域的特点,对监测数据的收集、预处理,在很多情况下只是为应用提供了必要的基础数据。传感器网络需要与其他系统(如 Internet)互连以满足用户复杂的信息处理需求。作为一种网络环境下的新型软件构件,以 Web service 为代表的服务为封装无线传感器网

络中的异构资源提供了新途径。目前,已有研究人员在考虑将两者结合起来构造新型无线传感器网络应用和中间件[32]。其中,如何在资源十分有限的无线传感器网络里实现基于 XML、SOAP 等的服务是一个十分具有挑战性的问题。

■ 无线传感器网络

作为下一代网络技术,网络致力于分布式环境下异构资源的协同共享。无线传感器网络面临着许多与网格相似的问题,例如:异构传感器的协同使用、海量异构数据的采集处理与共享、分布式环境下的应用协同、对动态运行环境的适应及系统自身的自组织等。网格技术的采用将有助于上述问题的解决,并可以增强无线传感器网络的计算能力。目前,波士顿大学等已经开始了这方面的研究[33]。

■ 面向无线传感器网络的软件工程

无线传感器网络在系统自组织、感知任务协同及节省能源等方面的要求给无线传感器网络应用的构造带来了新挑战。例如:传统无线\有线网络环境采用的客户端-服务器计算模式,已经不能适应自组织无线传感器网络拓扑结构动态变化及任务协同的需要。为此,需要研究新的软件参考结构、开发工具、测试工具和开发方法。另外,对于无线传感器网络中传感器软件、节点软件及网络应用的部署、维护也需要新的工具支持。目前,瑞士苏黎世联邦工学院、美国南加州大学和德国罗斯托克大学等已经开始了这方面的研究[34]。

6 结论

无线传感器网络是近年来十分活跃的一个研究领域,本文在对现有工作进行分析、比较的基础上,总结了无线传感器网络的特点及面临的挑战,给出了无线传感器网络的概念体系结构模型和设计原则,并指出了该研究领域中存在的主要问题、研究方向及最新研究动态。

参考文献

[1] Akyildiz, I. F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y.,

and Cayirci, E.. A Survey on Sensor Networks. *IEEE Communications Magazine*, 2002, 40(8):102-114.

[2] K. Akkaya and M. Younis. A Survey of Routing Protocols in Wireless Sensor Networks. *Elsevier Ad Hoc Network Journal*, 2005, 3(3):325-349.

[3] Archana Bharathidasan, Vijay Anand Sai Ponduru. *Sensor Network: An Overview*. <http://wwwcsif.cs.ucdavis.edu/~bharathi/sensor/survey.pdf>

[4] Li Jian-Zhong, Li Jin-Bao, Shi Sheng-Fei. Concepts, Issues and Advance of Sensor Networks and Data Management of Sensor Networks. *Journal of Software*, 2003, 14(10): 1717-1727 (in Chinese).

(李建中,李金宝,石圣飞. 传感器网络及其数据管理的概念、问题与进展. *软件学报*, 2003, 14(10):1717-1727.)

[5] Adam Wolisz. Towards a Service Definition for (Wireless) Sensor Networks. <http://www.vs.inf.ethz.ch/events/esf-wsn04/talks/wolisz.pdf>

[6] Tilak, S., Abu-Ghazaleh, N.B., Heinzelman, W. A Taxonomy of Wireless Micro-sensor Network Models. *ACM Mobile Computing and Communications Review*, 2002, 6: 28-36.

[7] Tang Yong, Zhou Ming-Tian, Zhang Xin. Overview of Routing Protocols in Wireless Sensor Networks. *Journal of Software*, 2006, 17(3):410-421(in Chinese).

(唐勇,周明天,张欣. 无线传感器网络路由协议研究进展. *软件学报*, 2006,17(3):410-421.)

[8] Cui Li, Jue Hailing, Miao Yong, Li Tianpu, Liu Wei, Zhao Ze. Overview of Wireless Sensor Networks. *Journal of Computer Research and Development*, 2005, 42(1):163-174 (in Chinese).

(崔莉,鞠海玲,苗勇,李天璞,刘巍,赵泽. 无线传感器网络研究进展. *计算机研究与发展*, 2005,42(1):163-174.)

[9] Vlado Handziski, Andreas Kopke, Holger Karl and Adam Wolisz, A Common Wireless Sensor Network Architecture? Technical Report TKN-03-012 of the Telecommunications Networks Group. Technische Universität Berlin,

- Berlin, Germany, 2003:10-17.
- [10] Ren Feng-Yuan, Huang Hai-Ning, Lin Chuang. Wireless Sensor Networks. *Journal of Software*, 2003, 14(7): 1282-1290 (in Chinese).
(任丰原, 黄海宁, 林闯. 无线传感器网络. *软件学报*, 2003, 14 (7):1282-1290.)
- [11] A. Manjeshwar and D. P. Agrawal. TEEN : A Protocol for Enhanced Efficiency in Wireless Sensor Networks. *Proceedings of the 1st International Workshop on Parallel and Distributed Computing Issues in Wireless Networks and Mobile Computing*, San Francisco, CA, 2001: 2009-2015.
- [12] D. Braginsky and D. Estrin. Rumor Routing Algorithm for Sensor Networks. *Proceedings of the First Workshop on Sensor Networks and Applications*, Atlanta, GA, 2002:22-31.
- [13] J. Hill, R. Szewczyk, A. Woo, S. Hollar, D. Culler, and K. Pister. System Architecture Directions for Networked Sensors. *Proceedings of the 9th International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems*, 2000: 93-104.
- [14] D. Estrin, R. Govindan, J. Heidemann, and S. Kumar. Next Century Challenges: Scalable Coordination in Sensor Networks. *Proceedings of ACM International Conference of Mobile Computing and Networking*, 1999: 263-270.
- [15] W. Heinzelman, J. Kulik, and H. Balakrishnan. Adaptive Protocols for Information Dissemination in Wireless Sensor Networks. *Proceedings of ACM International Conference of Mobile Computing and Networking*, 1999: 174-185.
- [16] W. Rabiner Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan. Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Micro sensor Networks. *Proceedings of International Conference of System Sciences*, Hawaii, 2000:3005-3014.
- [17] C. Intanagonwivat, R. Govindan, and D. Estrin. Directed diffusion: A Scalable and Robust Communication Paradigm for Sensor Networks. *Proceedings of ACM International Conference of Mobile Computing and Networking*, 2000: 56-67.
- [18] Y. Xu, J. Heidemann, and D. Estrin. Geography-informed Energy Conservation for Ad Hoc Routing. *Proceedings of ACM International Conference of Mobile Computing and Networking*, 2001: 70-84.
- [19] C.-C. Han, R. Kumar, R. Shea, E. Kohler, and M. Srivastava. A Dynamic Operating System for Sensor Nodes. *Proceedings of the 3rd International Conference on Mobile Systems, Applications and Services*, 2005: 163-176.
- [20] H. Abrach, S. Bhatti, J. Carlson, H. Dai, J. Rose, A. Sheth, B. Shucker, J. Deng, and R. Han. MANTIS: System Support for Multimodal NeTworks of In-Situ Sensors. *Proceedings of the 2nd ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications*, 2003: 50-59.
- [21] Adam Dunkels, Björn Grönvall, and Thiemo Voigt. Contiki - a Lightweight and Flexible Operating System for Tiny Networked Sensors. *Proceedings of the 29th Annual IEEE International Conference on Local Computer Networks (LCN'04)*, 2004: 455-462.
- [22] S. Dulman and P. Havinga. Operating System Fundamentals for the EYES Distributed Sensor Network. *Progress Report 2002*. Utrecht, the Netherlands, 2002.
- [23] Yong Yao, J. E. Gehrke. The Cougar Approach to In-Network Query Processing in Sensor Networks. *Sigmod Record*, 31(3), 2002: 9-18.
- [24] C. Shen, C. Srisathapornphat, C. Jaikao. Sensor Information Networking Architecture and Applications. *IEEE Personal Communications*, 18(4), 2001:52-59.
- [25] Lyndell St. Ville, Peter Dickman. Garnet: A Middleware Architecture for Distributing Data Streams Originating in Wireless Sensor Networks. *Proceedings of the 23rd International Conference on Distributed Computing Systems Workshops*, 2003: 235.
- [26] T. Liu and M. Martonosi. Impala: A Middleware System for Managing Autonomic, Parallel Sensor Systems. In *ACM SIGPLAN Symp. on Principles and Practice of Parallel Programming*, 2003: 107-118 .

- [27] Kay Römer, Oliver Kasten, Friedemann Mattern. Middleware Challenges for Wireless Sensor Networks. ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review, 6(4), 2002: 59 -61.
- [28] University of Southern California. The Network Simulator ns-2. http://nslam.isi.edu/nslam/index.php/User_Information, 2006-03-23.
- [29] Rimon Barr, Zygmunt J. Haas and Robbert van Renesse. JiST: An Efficient Approach to Simulation Using Virtual Machines. Software Practice and Experience, 35(6), 2005: 539-576.
- [30] P. Levis, N. Lee, M. Welsh, and D. Culler. TOSSIM: Accurate and Scalable Simulation of Entire TinyOS Applications. Proceedings of the 1st International Conference on Embedded Networked Sensor Systems, 2003:126-137.
- [31] S. Park, A. Savvides, and M. Srivastava. SensorSim: A Simulation Framework for Sensor Networks. Proceedings of the ACM international Workshop on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems, 2000: 104-111.
- [32] Jinglun Shi, Weiping Liu. A Service-oriented Model for Wireless Sensor Networks with Internet. Proceedings of the Fifth International Conference on Computer and Information Technology, 2005: 1045-1049.
- [33] Gaynor, M., and Welsh, M, and Moulton, S, and Rowan, A, and LaCombe, E, and Wynne, J, Integrating Wireless Sensor Networks with the Grid. IEEE Internet Computing, 2004, July/Aug: 32-39.
- [34] Blumenthal, J., Handy, M., Golatowski, F., Haase, M., and Timmermann, D. Wireless Sensor Networks - New Challenges in Software Engineering. Proceedings of 9th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, 2003: 551-555.



Li Gang, born in 1972, Dr., visiting researcher at the Computer Science Department of Humboldt University Berlin, Humboldt research fellow, associate professor of Institute of Computing Technology CAS. His current research interests include wireless sensor network, service composition and service oriented grid computing.



Jens Peter Redlich, born in Wittenberge/Germany, Dr., full professor at the Computer Science Department of Humboldt University Berlin, Senior Research Advisor at NEC Europe Ltd. His current research interests include ad-hoc networks, wireless multi-hop networks, middleware architectures, wireless sensor network and IT security.

1. SAR-PR-2005-01: Linux-Hardwaretreiber für die HHI CineCard-Familie. Robert Sperling. 37 Seiten.
2. SAR-PR-2005-02, NLE-PR-2005-59: State-of-the-Art in Self-Organizing Platforms and Corresponding Security Considerations. Jens-Peter Redlich, Wolf Müller. 10 pages.
3. SAR-PR-2005-03: Hacking the Netgear wgt634u. Jens-Peter Redlich, Anatolij Zubow, Wolf Müller, Mathias Jeschke, Jens Müller. 16 pages.
4. SAR-PR-2005-04: Sicherheit in selbstorganisierenden drahtlosen Netzen. Ein Überblick über typische Fragestellungen und Lösungsansätze. Torsten Dänicke. 48 Seiten.
5. SAR-PR-2005-05: Multi Channel Opportunistic Routing in Multi-Hop Wireless Networks using a Single Transceiver. Jens-Peter Redlich, Anatolij Zubow, Jens Müller. 13 pages.
6. SAR-PR-2005-06, NLE-PR-2005-81: Access Control for off-line Beamer – An Example for Secure PAN and FMC. Jens-Peter Redlich, Wolf Müller. 18 pages.
7. SAR-PR-2005-07: Software Distribution Platform for Ad-Hoc Wireless Mesh Networks. Jens-Peter Redlich, Bernhard Wiedemann. 10 pages.
8. SAR-PR-2005-08, NLE-PR-2005-106: Access Control for off-line Beamer Demo Description. Jens Peter Redlich, Wolf Müller, Henryk Plötz, Martin Stigge. 28 pages.
9. SAR-PR-2006-01: Development of a Software Distribution Platform for the Berlin Roof Net (Diplomarbeit / Masters Thesis). Bernhard Wiedemann. 73 pages.
10. SAR-PR-2006-02: Multi-Channel Link-level Measurements in 802.11 Mesh Networks. Mathias Kurth, Anatolij Zubow, Jens Peter Redlich. IWCMC 2006 - International Conference on Wireless Ad Hoc and Sensor Networks, Vancouver, Canada, July 3-6, 2006.
11. SAR-PR-2006-03, NLE-PR-2006-22: Architecture Proposal for Anonymous Reputation Management for File Sharing (ARM4FS). Jens-Peter Redlich, Wolf Müller, Henryk Plötz, Martin Stigge, Torsten Dänicke. 20 pages.
12. SAR-PR-2006-04: Self-Replication in J2me Midlets. Henryk Plötz, Martin Stigge, Wolf Müller, Jens-Peter Redlich. 13 pages.
13. SAR-PR-2006-05: Reversing CRC – Theory and Practice. Martin Stigge, Henryk Plötz, Wolf Müller, Jens-Peter Redlich. 24 pages.
14. SAR-PR-2006-06: Heat Waves, Urban Climate and Human Health. W. Endlicher, G. Jendritzky, J. Fischer, J.-P. Redlich. In: Kraas, F., Th. Krafft & Wang Wuyi (Eds.): Global Change, Urbanisation and Health. Beijing, Chinese Meteorological Press (submitted). 8 pages.
15. SAR-PR-2006-07: 无线传感器网络研究新进展 (State of the Art in Wireless Sensor Networks). 李刚(Li Gang), 伊恩斯·彼得·瑞德里希 (Jens Peter Redlich). 11 pages.