

自组织、自适应无线传感器网络理论研究*

刘 刚, 周兴社, 谷建华, 李志刚

(西北工业大学 计算机学院, 陕西 西安 710072)

摘 要: 无线传感器网络是当前信息技术的前沿之一, 在生态环境监测、基础设施安全、先进制造、物流管理、医疗健康、工业传感、智能交通控制、智能能源及军事等领域具有十分广阔的应用前景。无线传感器网络独特的要求和制约因素决定了不能仅只依靠现有的网络机制和技术, 而必须重新设计适合无线传感器网络特点和要求的自组织自适应的网络。分析了传感器网络自组织、自适应的特点与需求, 并在此基础上就其中的若干关键性科学问题进行了探讨。

关键词: 无线传感器网络; 自组织; 自适应; 任务分配与协调控制

中图法分类号: TP393. 01 文献标识码: A 文章编号: 1001-3695(2005) 05-0030-04

Self-configuration and Self-healing in Wireless Sensor Networks

LIU Gang, ZHOU Xing-she, GU Jian-hua, LI Zhi-gang

(College of Computer, Northwestern Polytechnical University, Xi'an Shanxi 710072, China)

Abstract: Wireless sensor network is a novel technology in information technologies and has a wide application future. Because of the particular characteristics and limit, we must design a new self-configuration and self-healing network for wireless sensor network. This paper analyses the characteristics and requirement of self-configuration and self-healing wireless sensor networks, then discusses several key issues.

Key words: Wireless Sensor Networks; Self-configuration; Self-healing; Task Distributing and Collaborative Control

1 引言

随着传感技术、通信技术和计算机技术的飞速发展以及 MEMS 技术的日益成熟与完善, 无线传感器网络作为一项新型的信息技术日益受到国内外的高度重视。众多具有通信、计算能力的传感器(或作动器)通过无线方式连接, 相互协作, 同物理世界进行交互, 共同完成特定的应用任务, 称为无线传感器网络(Wireless Sensor Network)。因特网改变了人与人之间交流、沟通的方式, 而无线传感器网络将逻辑上的信息世界与真实物理世界融合在一起, 将改变人与自然交互的方式。作为连接物理世界和虚拟世界的桥梁, 无线传感器网络与效用计算、塑料电子、人体仿生一起被认为是全球未来四大高技术产业。

无线传感器网络技术进展飞速, 硬件方面的条件逐渐成熟, 成本不断降低, 微型化程度不断提高。美国 Dust 公司已经开始设计最终能够悬浮于空气中的“Smart Dust”传感器, 直径只有 5mm 左右, 计划在近期内最终设计出体积小于 1mm^3 的产品。具有无线通信和识别能力且价格十分低廉的射频标签可以看作是传感器网络技术的一个特例, 它能够对物品进行无接触的快速标志和识别, 大大提高物流管理的精确度和效率。很多大公司现已在部署第一代系统, 著名的沃尔玛连锁店已经投入资金, 在货物上加装射频识别条型码芯片(RFID), 使该公司和供应商能够跟踪从生产厂到收款台的商品流向。这种技

术可望减少商品失窃率和其他损失, 并能节省仓库占用及商店的人力成本。

与 Internet 技术相似, 无线传感器网络最初也是由美国军方提出来的, 在战场监测等领域的应用十分重要(如友军兵力、装备、弹药调配监视; 战区监控; 敌方军力的侦察; 目标追踪; 战争损伤评估; 核、生物和化学攻击的探测与侦察等)。无线传感器网络的研究直接推动了以网络技术为核心的新军事革命, 诞生了网络中心战的思想 and 体系。无线传感器网络是网络中心战体系中面向武器装备的网络系统, 是 C4ISR 的重要组成部分。目前, 无线传感器网络的应用已由军事领域扩展到其他许多领域, 能够完成传统系统无法完成的任务。在环境监测领域, 它可以用于森林火灾的监测、环境的生物复杂性映射、洪水监测、精密农业等。在医疗卫生中, 可以实现人体生理指标的远程监测、医院内医生和患者的跟踪、药物管理等。此外在家居自动化、车辆跟踪与控制、库存管理控制、特定场景(如博物馆)智能化等诸多方面均具有广泛的应用前景。

虽然美国军方早在 20 世纪 70 年代就开展了类似传感器网络的研究工作, 但是由于当时技术的限制, 直到近几年这方面的研究活动才在全世界范围内蓬勃开展起来。美国国防部在这方面的投入尤为巨大, 已经累计开展了多个重大相关项目, 如 DARPA 资助的分布式传感器网络项目, 开发以网络为中心的作战系统, 传感器信息技术项目, 以及美国海军开发的协同作战能力(CEC)项目等。目前国外很多大学和研究机构都在大力开展无线传感器网络的研究。美国大学 UCB 的 SmartDust 项目, GIT 的 SensorNet 项目, UCLA 的 GRANET 项

目, MIT 的 AMPS 项目, Vlrina 大学的 NEST 项目, 瑞士 ETHZ 大学的 Smart-Its Project, 英国 Glasgow 大学的 Garnet 项目, 还有其他国家和地区, 如芬兰、德国、台湾的科研机构相继立项对这种无线传感网络进行了研究。

2 无线传感器网络的自组织、自适应特点及需求

自组织、自适应是自然界和人类社会当中许多复杂网络中普遍存在的现象, 是新兴的网络化系统理论的主要研究内容。以 Internet 为代表的大规模的复杂通信网络成功运行表明, 适当设计的自组织、自适应机制能够为在未知环境中运行的网络带来灵活性, 适应性和有效性良好的平衡。通过从理论上和实验上对适合无线传感器网络的自组织、自适应机制的研究, 能够很好地解决快速响应、可靠性与耗能之间的基本矛盾。

无线传感器网络的特点是节点的电源能量有限、通信能力有限、计算能力有限、与物理世界紧密耦合、大规模密集部署、网络动态性强。为了准确、及时的获取信息, 必须依靠节点间的协作, 大量的 MEMS 传感器节点只有通过低功耗无线电通信技术连成网络才能够发挥其整体和综合作用, 所以传感器网络作为一个自治系统, 涉及到定位及时间同步、协同信号处理、通信模式及协议、网络容量、寿命、任务分配协调控制、自适应性、中间件等诸多问题。

无线传感器网络的自组织、自适应特点对计算技术提出新的需求:

(1) 主动计算(Proactive Computing) 能力。传统网络系统(如 Internet) 很少或不与真实的物理世界交互, 其研究主要集中在如何同用户进行交互或如何方便用户彼此进行交互, 因此这种计算模式称之为交互计算(Interactive Computing)。在交互计算系统中, 由于人的因素存在, 整个系统的智能主要构建于人的智能基础上, 即人处于计算循环之中, 起着中心作用。而对于无线传感器网络而言, 由于其与物理世界耦合性, 物理现象取代人成为整个网络的中心。实际上, 无线传感器网络可能部署在无人区域或危险区域, 不可能依靠人对系统进行配置与管理, 系统必须能够自我组织、自我配置, 其运行主要取决于物理环境的刺激和系统本身的状态。因此, 这种分散、自治的计算模式称为主动计算。

(2) 需要能源感知(Energy-aware) 计算, 最大化系统生命期。无线传感器网络的某些应用(如森林火灾监测), 要求系统生命期必须达到数月, 甚至数年的级别, 而传感器节点一般由电池驱动, 能源有限(再生能源技术又不成熟, 成本高, 目前还无法应用于微型传感器节点), 且对于大规模与物理环境紧密耦合的系统而言, 更换电池补充能源的方式是不现实的, 这使得能源消耗成为确定系统生命期的最重要因素。图 1 所示为传感器节点在各种状态下的能量消耗。因此, 需要将能源感知加入到无线传感器网络设计和操作的每一个阶段, 充分挖掘系统在能源使用方面的潜力, 使系统能够在能源消耗、系统性能和操作精度之间作出动态权衡, 最大化整个网络的生命期。

(3) 系统必须具有很好的可扩展性。无线传感器网络的庞大规模, 要求无线传感器网络协议、算法必须具有良好的可扩展性。对于这样的系统, 集中控制显然不能满足需求, 必须

利用局部算法(Localized Algorithm), 即传感器节点只同有限范围内的邻居节点交互(无线传感器网络可能形成层次结构, 不同层以自己的局部概念进行交互), 但聚集起来却可以实现期望的全局任务。同时, 无线传感器网络的密集部署特性, 导致系统若干节点的失效不会对系统的正常运行产生重要影响, 因此无线传感器网络协议和算法的鲁棒性设计必须考虑无线传感器网络密集分布的特性。

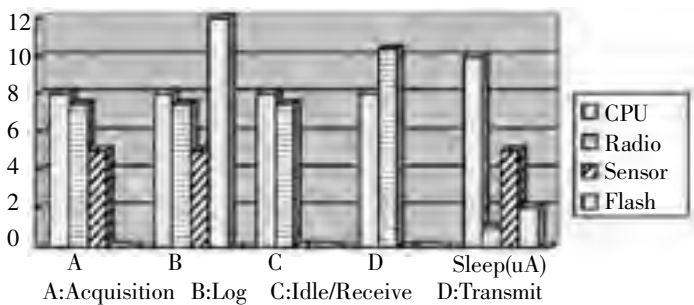


图 1 节点在各种状态下能量的消耗(纵坐标为 mA)

(4) 系统必须具有自适应计算能力。无线传感器网络在其生命期内, 物理环境具有不确定性, 系统本身呈现高度的动态性, 因此, 无线传感器网络必须具有一定的学习和适应能力, 能够根据环境与系统的变化并相应改变自己的行为。例如, 在系统可用能源较少的情况下, 无线传感器网络必须能够对操作策略进行调整(如降低采集数据的精度), 从而延长系统的生命期。无线传感器网络的自适应通常是由于可用资源(包括可用能源、计算资源、通信带宽) 或负载动态变化, 导致系统操作参数的改变, 其策略的实现必须考虑资源有限、空间分布、密集部署等特性的影响。

3 自组织、自适应无线传感器网络问题研究

无线传感器网络独特的要求和制约因素就决定了我们不能仅仅依靠现有的网络机制和技术, 而必须重新设计适合无线传感器网络特点和要求的自组织自适应的网络。因此自组织、自适应传感器网络理论的研究涉及面十分广泛, 从 MAC 层、网络层到应用层都需要针对其特点进行重新设计。本文将就其中若干关键性科学问题进行探讨, 希望能对我国从事传感器网络的研究起到一定借鉴作用。

3.1 MAC 层的改进

无线传感器网络的 MAC 层协议必须达到两个目标: 创建网络基础设施。由于数千个传感器节点密集分散在感知区域, MAC 层协议必须为数据传输建立通信链路; 在传感器节点间公平有效地共享通信资源。传统的无线 MAC 层协议或者没有考虑能源有效性, 或者需要全局协调。对于 MAC 层的改进主要在基于现有无线 MAC 层协议的基础上增加天线开关状态以及动态电压的调整控制, 实现能源的自适应管理。当传感节点处在不发送或接收数据的空闲状态时, 如果天线保持开状态将会持续侦听造成不必要的能量消耗, 这也是最主要的能量浪费。因此需要设计出节能, 高扩展性, 低开销, 同时又兼顾公平性的 MAC 层协议。现有的解决方案主要有:

(1) 基于 CSMA/CA 的 MAC 协议改进。无线局域网标准 802. 11 的节能模式在信标间隔(Beacon Interval) 周期内关闭掉一些不收发数据的节点的天线, 但这样就要求建立全网的时间同步, 所以开销很大不适合无线传感网络。在此基础上提出

S-MAC 协议, 其原理只需要邻居节点之间建立同步关系, 建立了同步关系的节点之间同步定期关闭天线。而且收发数据阶段收发节点的邻居节点的天线也要关闭以防止空闲侦听, 其特点适合于突发数据流。该方案的缺陷在于时延的增加和无法保障公平性, 而且在重负载情况下由于碰撞的加剧造成的数据重传会导致能量的极大消耗。

(2) 基于 TDMA 的 MAC 协议改进。由中心节点负责调度其他各个节点的收发时隙, 每个节点在不处于收发时隙的时刻将天线关闭, 其特点适用于平稳数据流。这种方案就需要中心节点对时隙进行调度与维护, 并且节点之间要保持精确的同步关系, 对中心节点复杂度要求较高。

(3) 动态电压调整 (Dynamic Voltage Scaling, DVS)。采用 DVS 技术来节省节点计算时的能量消耗, DVS 技术是通过调整处理器的电压供给以使处理器工作在不同的频率以满足不同的计算要求。现在的很多微处理器都支持 DVS 技术, 如 Intel 的 StrongArm。对无线传感器网络而言, 节点计算负载是时变的, 因而可以通过 DVS 技术来改变工作电压以适应不同的计算负载要求。

(4) 无线网络动态调制编码技术。由于不同的调制编码技术需要的能量消耗不同, 而传感器节点负载是时变的, 所以可以通过动态调整调制编码参数来适应动态变化的通信负载。

现有的工作在通信模式及协议的设计上虽然考虑了节省能耗的问题, 但没有考虑如何让节点来根据所承担的任务及周围环境来自适应的调整其参数来达到自治的目的, 如果节点不能根据所处环境进行自适应的调整, 就无法达到优化服务质量及最小化能耗的目标。

3.2 网络组织结构与协议

无线传感器网络节点数以万计, 节点之间存在着松散的耦合, 构成一个高度复杂的大系统。分层是降低复杂度的一个途径, 通过分层可以有效地协调任务调度、协调定位和时间同步、信道接入、数据/控制指令的传送、有效地融合数据。如何分层、分几层、每簇的大小、簇内的通信机制、簇间的通信机制对系统性能影响很大。图 2 是一种典型的无线传感器网络分层组织结构。传感器网络要服务于具体的应用, 不同的应用有不同的源数据特征, 对时延、可靠性、能耗、健壮性的要求不尽相同, 需要研究自适应的分层机制和通信机制以适应具体应用的要求。目前的传感器网络的通信特征是多到一 (MANY-TO-ONE) 的方式, 必然造成临近 SINK 节点的负荷过重, 这些节点将提前死亡, 使得网络的连通性受到破坏, 因此必须设计有效的措施消除这个不均衡的能量消耗。传感器网络拓扑管理就是基于这一目的。SPAN 和 GAF 协议是两个关于拓扑管理的代表性协议, 其出发点是只需要一部分节点处于激活状态就可以保证整个网络的覆盖和连通, 一般情况下其余节点处于睡眠状态, 在需要收发数据的时候才被唤醒。该协议选择最具有通信需求的节点作为担任通信任务的节点, 而其他节点处于睡眠状态, 当通信模式发生变化时, 才切换节点间的通信角色。SMAC 和 STEM 从另一个角度考虑拓扑管理的问题, 它们的出发点是由于传感器网络节点所需传输的数据量并不大, 很多时候节点处于空闲状态, 从而可以通过周期性的让节点睡眠来达到节能的目的, 但节点的周期性睡眠必然会造成通信的时延加

大。节点激活时间占整个周期的比例 (即占空比) 用于权衡传输时延与能量消耗, SMAC 和 STEM 协议都设置了固定的占空比来节省能耗。还有许多基于能源优化的分层组织结构与协议 (如 EEPC 等), 其基本原理是使节点 i 在任意时刻 t 成为中心节点的概率为节点 i 在该时刻的能量储备占整个类内网络能量的比例的函数, 这样使中心节点的高能量消耗平均分散到各个节点上, 同时也避免了固定中心节点引起的网络的脆弱性和不稳定性。

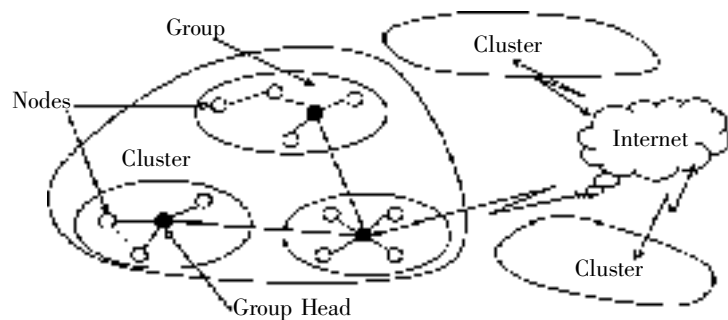


图 2 典型 WSN 分层结构

能量约束、计算和存储能力的限制以及自组织网络结构等特点使得传统的无线通信协议并不适合应用于传感器网络, 研究适合于无线传感器网络的无线通信协议是传感器网络研究中的热点。传统的无线 Ad hoc 路由技术通常不符合传感器网络的需求, 传感器网络的路由必须考虑能源有效性需求, 以数据为中心, 聚类方式或者利用位置信息进行路由。以数据为中心的路由通过数据压缩的方式减少网络中的数据冗余; 聚类路由协议将网络划分为若干个聚类, 在聚类中选出的主导节点 (Cluster-header) 进行远距离通信, 以减少通信量; 基于位置信息的路由方式根据已知的邻居节点定位信息和目标节点的位置坐标判断出最佳的路由以节约能源。以上方案各具优势, 但不能完全解决问题。以数据为中心的路由方式, 必须解决网络规模较大时基站附近节点能量消耗较大的问题; 聚类方式中主导节点的选举和轮换机制是仍待解决的问题; 基于位置信息的路由方式中, 测距和定位仍然是主要问题。如何针对传感器网络的特性, 设计有效节能, 扩展性和适应性较好, 延迟时间短的通信协议, 与数据管理等应用层任务实现跨层优化, 仍是亟待解决的问题。

现有的网络组织结构及协议主要考虑如何在满足数据收集任务质量要求的前提下节能以最大化生命周期。节点不能根据所需应用进行自配置, 限制了网络的可扩展性。而由于无线传感器资源的不确定性, 为达到任务的合理分配和资源的有效控制和优化, 必须要求传感器网络的通信模式与协议应该是可配置的。即各层多种协议的自适应选取及协议参数的自适应选择。因此, 研究适合于各种应用、协议参数可配置的通信模式和协议, 以支持任务协调控制的无线传感器网络分布自治系统, 有着重要的意义。

3.3 资源分配与协调控制

无线传感器网络以多个传感器协同的方式工作, 完成诸如目标发现、定位、跟踪等使命任务。网络中传感器具有不同的感知、信息处理和通信能力等资源, 这些能力是完成上述任务所必需的资源。任务安排和资源分配是传感器网络信息处理的重要环节。无线传感器网络的动态资源分配是一类软实时分布资源分配问题。其关键问题有: 以无线传感器网络任务

安排与资源分配为应用背景的软实时分布资源分配问题的运行体系和组织结构; 分布式动态任务安排与资源分配算法。此外, 传感器网络的任务分解与资源分配过程中, 被监测的现象动态地变化, 具有不确定性; 为完成监测任务进行的信息交互, 受通信能力的限制, 只能以分布的方式进行处理; 同时, 信息处理有软实时的要求。鉴于这一问题约束搜索空间巨大, 节点处理和通信能力有限, 不宜采用集中的信息处理方式, 而基于局部信息的决策难以达到实时全局最优资源分配策略, 所以这里还存在着局部策略与全局指标的关系问题。

与任务分配相关的研究主要集中在资源和任务的准入控制, 它受传感器节点的是否可到达、能否获得所需通信带宽以及满足与应用相关的任务期限等的限制。因而在传感器网络的能耗、运算和通信资源进行建模后, 考虑任务的需求及其执行的效率, 确定最优的资源分配方案的模型, 从而对任务进行裁决和分配。

协调控制致力于实现整个传感器网络的效能优化和寿命延长, 目前主要的研究集中于无线传感器网络的分布自治系统及协调控制的最优多级控制系统架构, 强调控制系统的自适应性、灵活伸缩性、运行可靠性和对环境的鲁棒性。研究的核心问题有: 根据环境的变化、任务目标的不确定性和网络系统自身的动态变化, 自主、在线地确定网络拓扑结构, 通过合作, 最优完成使命任务的方法; 针对自主单节点, 研究给定任务条件下, 行为序列的生成方法, 即如何使任务中的各个事件在时间上和事件顺序上有效地自组织和协调起来而不发生冲突。

除了上述三个方面的问题以外, 定位与时间同步、路由协议、拥塞与流量控制、数据融合与管理、软件平台的构建等也是自组织、自适应传感器网络所涉及的科学问题, 都需要进一步深入的研究。

4 结论

无线传感器网络对国民经济、人民生活和国防安全将产生的巨大影响已被世界各国广泛认同, 美国等发达国家都将传感器网络的研究计划列为重中之重, 在最近和以后的数年里给予大力支持。无线传感器网络与物理世界紧密耦合、大规模密集部署、资源有限、网络动态性强的特点决定了我们不能仅仅依靠现有的网络机制和技术, 而必须重新设计适合其特点和要求的自组织、自适应的网络。本文旨在对自组织、自适应无线传感器网络中存在的一些关键科学问题进行探讨, 期望能对我国无线传感器网络今后的发展和应用起到积极作用。

参考文献:

[1] ensor Networks and Applications[J] . Special Issues in Proceeding of the IEEE, 2003, 91(8) .

[2] S Kumar, D Shepherd. SensIT: Sensor Information Technology for the Warfighter[C] . Proc. 4th Int. Conf. on Information Fusion, 2001, TuC1-TuC1-9.

[3] D Steere, A Baptista, D McNamee, *et al.* Research Challenges in Environmental Observation and Forecasting Systems[C] . Proc. 6th Int. Conf. Mobile Computing and Networking(MOBICOMM) , 2000. 292-299.

[4] A Mainwaring, J Polastre, R Szewczyk, *et al.* Wireless Sensor Networks for Habitat Monitoring[C] . Atlanta, GA: ACM International

Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications (WSNA 02) , 2002.

[5] D Jensen. SIVAM: Communication, Navigation and Surveillance for the Amazon[J] . Avionics Magazine, 2002, (6) .

[6] Wei Ye, John Hedemann. Medium Access Control in Wireless Sensor Networks[R] . USC/ISI Technical Report ISI-TR-580, OCTOBER, 2003.

[7] Joseph Polastre. Sensor Network Media Access Design [R] . Technique Report, UC Berkeley, 2003.

[8] Wendi Rabiner Heinzelman, Anantha Chandrakasan, Hari Balakrishnan. Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks[C] . Proceedings of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences, 2000.

[9] Moustafa A Youssel, Mohamed F Younis, Khaled A Arisha. A Constrained Shortest Energy-aware Routing Algorithm for Wireless Sensor Networks[C] . WCNC, 2002.

[10] W Heinzelman, J Kulik, H Balakrishnan. Adaptive Protocols for Information Dissemination in Wireless Sensor Networks [C] . Seattle, WA: the Proceedings of the 5th Annual ACM/ IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom 99) , 1999.

[11] C Intanagonwiwat, R Govindan, D Estrin. Directed Diffusion: A Scalable and Robust Communication Paradigm for Sensor Networks [C] . Boston, MA: The Proceedings of the 6th Annual ACM/ IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom 00) , 2000.

[12] C Schurgers, M B Srivastava. Energy Efficient Routing in Wireless Sensor Networks[C] . McLean, VA: The MILCOM Proceedings on Communications for Network-Centric Operations: Creating the Information Force, 2001.

[13] A Savvides, C C Han, M B Srivastava. Dynamic Fine-Grained Localization in Adhoc Networks of Sensors[C] . Rome, Italy: The Proceedings of MOBICOM 01, 2001.

[14] L Subramanian, R H Katz. An Architecture for Building Self Configurable Systems [C] . Boston, MA: The Proceedings of IEEE/ACM Workshop on Mobile Adhoc Networking and Computing, 2000.

[15] N Bulusu, J Heidemann, D Estrin. Adaptive Beacon Placement[C] . Phoenix, Arizona, USA: Proceedings of the 21st International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS-21) , 2001.

[16] T He, C Huang, B M Blum, *et al.* Range-Free Localization Schemes in Large Scale Sensor Networks[C] . San Diego, California, USA: MOBICOM '03, 2003.

[17] Koen Langendoen, Niels Reijers. Distributed Localization in Wireless Sensor Networks: A Quantitative Comparison[J] . Computer Networks, 2003, 43: 499-518.

[18] A Nasipuri, K Li. A Directionality-based Location Discovery Scheme for Wireless Sensor Networks[C] . The Proceedings of the 1st ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications (WSNA 02) , in Conjunction with ACM Mobicom 02, 2002.

[19] Neal Patwari, Alfred O Hero III. Using Proximity and Quantized RSS for Sensor Localization in Wireless Networks[C] . San Diego, California, USA: WSNA 03, 2003. 20-28.

[20] J C Chen, K Yao, R E Hudson. Source Localization and Beamforming[J] . IEEE Signal Processing Magazine, 2002, (3) : 30-39.

作者简介:

刘刚(1979-) ,男,博士研究生, 主要研究方向为网络化嵌入计算;周兴社(1955-) ,教授,博士生导师, 主要研究领域为网络与分布式计算;谷建华(1967-) ,教授, 主要研究领域为网络化嵌入计算与软件构建;李志刚(1975-) ,男,博士研究生, 主要研究方向为网络化嵌入计算。