

# 传感器网络

李天璞 鞠海玲 崔莉

传感器网络是当前国际上备受关注的、由多学科高度交叉的新兴前沿研究热点领域。传感器网络综合了传感器技术、嵌入式计算技术、现代网络及无线通信技术、分布式信息处理技术等,能够通过各类集成化的微型传感器协作地实时监测、感知和采集各种环境或监测对象的信息,通过嵌入式系统对信息进行处理,并通过随机自组织无线通信网络以多跳中继方式将所感知信息传送到用户终端。从而真正实现“无处不在的计算”理念。传感器网络的研究采用系统发展模式,因而必须将现代的先进微电子技术、微细加工技术、系统 SOC (system-on-chip) 芯片设计技术、纳米材料与技术、现代信息通讯技术、计算机网络技术等融合,以实现其微型化、集成化、多功能化及系统化、网络化,特别是实现传感器网络特有的超低功耗系统设计。传感器网络具有十分广阔的应用前景,在军事国防、工农业、城市管理、生物医疗、环境监测、抢险救灾、反恐反恐、危险区域远程控制等许多领域都有重要的科研价值和巨大实用价值,已经引起了世界许多国家军界、学术界和工业界的高度重视,并成为进入 2000 年以来公认的新兴前沿热点研究领域,被认为是将对二十一世纪产生巨大影响力的技术之一。

## 1 传感器网络节点和网络体系结构

一个典型的传感器网络的体系构建包括分布式传感器节点(群)、接收发送器、互联网和用户界面等。

其中,传感器网络节点的基本组成和功能包括如下几个单元[1]:传感单元(由传感器和模数转换功能模块组成)、处理单元(由嵌入式系统构成,包括 CPU、存储器、嵌入式操作系统等)、通信单元(由无线通信模块组成)、以及电源部分,如图 1 所示。此外,可以选择的其它功能单元包括:定位系统、移动系统以及电源自供电系统等。

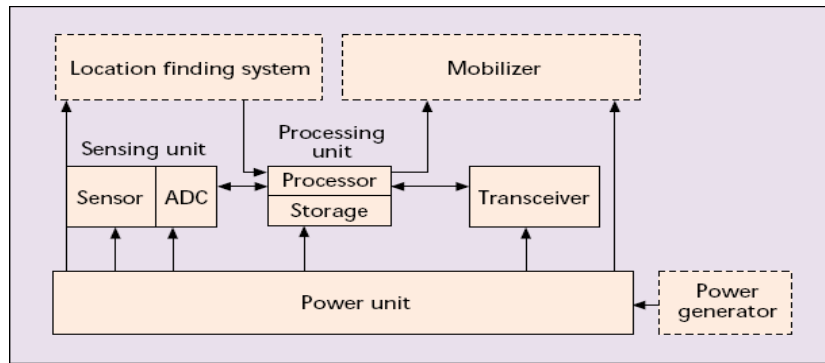


图 1 传感器网络节点结构

在传感器网络中，节点通过飞机布撒，人工布置等方式[2]，大量部署在感知对象内部或者附近。这些节点通过自组织方式构成无线网络，以协作的方式感知、采集和处理网络覆盖区域中特定的信息，可以实现对任意地点信息在任意时间的采集，处理和分析。这种以自组织形式构成的网络，通过多跳中继方式将数据传回 sink 节点(接收发送器)，最后借助 sink 链路将整个区域内的数据传送到远程控制中心进行集中处理。一个典型的传感器网络的体系结构包括分布式传感器节点（群）、sink 节点、互联网和用户界面等[3]，如图 2 所示。在传感器网络中绝大多数的节点只有很小的发射范围，而 sink 节点的发射能力较强，具有较高的电能，可以把数据发回远程控制节点。

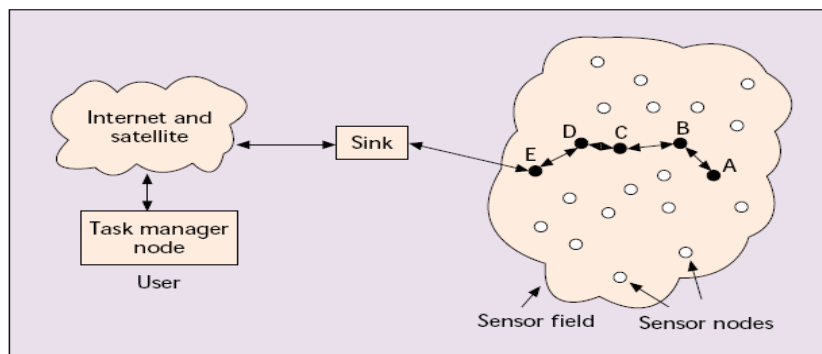


图 2 一个典型的传感器网络体系结构

## 2 传感器网络研究热点问题和关键技术

传感器网络以应用为目标，其构建是一个庞大的系统工程，涉及到的研究工作和需要解决的问题在每一个层面上都很多。对无线传感器网络系统结构及界面接口技术的研究意义重大。如果我们把传感器网络按其功能抽象成五个层次的话，将会包括基础层（传感器集合）、网络层（通信网络）、中间件层、数据处理和管理层以及应用开发层。

其中,基础层以研究新型传感器和传感系统为核心,包括应用新的传感原理、使用新的材料以及采用新的结构设计等,以降低能耗、提高敏感性、选择性、响应速度、动态范围、准确度、稳定性以及在恶劣环境条件下工作的能力。还包括多通道传感器以及无线通信芯片的系统集成,以及嵌入式处理器的集成化。此外,还包括通过对嵌入式操作系统的研究,实现利用有效资源对整体系统进行高效率的事件处理、能源管理、命令处理和工作描述。另外,超低能耗的传感器节点的设计、各功能部件的接口及系统集成方法、与信号处理中心之间实现高速的通信以保证决策人做出迅速及时的反应也是研究的重点内容。目前这一代节点产品大都采用各类通用芯片(如普通八位微处理器,如 Atmega128L,以及通用无线通信模块 CC1000 等)和元器件进行集成开发。而某些面向 2010 年的下一代节点将完全采用 SOC 方法,以真正实现微型化并大大降低节点成本。这方面代表性的项目有非常有名的 Smart Dust [4]。

网络层以通信网络为核心,实现传感器与传感器、传感器与用户之间的通信,对传感器节点进行有效的控制和管理,支持多传感器协作完成大型感知任务。需要展开的研究工作包括低能耗、高速率、长生命周期的无线传感器网络的随机自组织通信协议、通信方式及自重构、自调整性;无线传感器网络的可扩展性、容错性、可维护性及安全性、隐私性;传感器网络的特性(有别于已有的互联网和 Ad hoc 无线网络);适用于传感器网络的网络通信模式、支持传感器网络通信的各种协议、时间同步、任务分配与协调控制以及相应的软硬件资源等方面。

中间件层研究具有通用性能的标准中间层软件结构,负责传感器网络系统的资源管理、动态环境分析,以及普适应用的开发支持,如应用功能改换、功能扩展、系统升级、重复再利用等关键性能的实现。

数据处理和管理层以传感器数据管理与处理软件为核心,包括以数据为中心的实时分布式数据流管理、查询及相关信息处理技术;支持感知数据的采集、存储、查询、分析等各种数据管理和分析处理软件系统,新型统计算法、排除误差信息的方法、对大型分布式传感器阵列的协同处理、图象识别方法等。

应用开发层由各种传感器网络应用软件组成。

显然,围绕实现网络整体低功耗运行,在基础层上针对传感器节点开展研究工作是整体传感器网络研究的起点和基础。以上提到的网络节点中涉及到的各项技术无疑是最为关键的

一部分技术。此外，针对适合传感器网络特点、支持传感器网络工作的网络协议这一关键技术的研究也是极为重要和迫切的（相关研究介绍见第 3 节），将会直接影响整体工作水平和实用化的进程。

### 3 传感器网络协议研究

在早期的研究中，人们认为 ad hoc 网协议稍加修改甚至无需修改就可以直接应用于无线传感器网络。但是随着研究的深入，人们逐渐认识到这两种网络具有许多不同的特点，传感器网络不能简单借用以往（所谓“传统的”）ad hoc 网的协议。原因如下[3]：

1. 传感器网络中的节点数量和分布密度远远超过以往 ad hoc 网络中的节点数；
2. 大部分节点不像 ad hoc 节点一样快速移动；
3. 传感器节点出现故障的可能性要大于 ad hoc 网络；
4. 传感器节点的存储能力、计算能力和电能有限；
5. 传感器节点主要采用广播方式通信，而 ad hoc 网络大都采用点对点方式通信；
6. 由于数目极大，传感器节点不一定具有全球唯一的标识；

目前传感器网络协议的研究重点集中在网络层和 MAC(Media Access Control)层，下面做一个简要介绍。

#### 3.1 链路层

协议堆栈中的数据链路层通常提供两个主要服务：媒体访问控制(MAC)和错误控制。

蜂窝电话网络和蓝牙技术是目前常用的无线网络技术，但它们的 MAC 层协议不适合无线传感器网络。在蜂窝电话网络中，移动节点可以方便地反复充电，MAC 层主要的功能是保证服务质量和带宽的高效利用，能耗控制是第二位的。而蓝牙技术则采用星型拓扑结构，不适合传感器网络的应用。

载波监听多点接入(CSMA-Carrier Sense Multiple Access)在自组传感器网络中最为常用。这主要是因为它易于实现，但更重要的是它可提高大型网络的信道复用率。

使用 CSMA 方式时，网络节点在开始传输数据包之前要监听通信信道并检测它是否空闲。如果信道已被占用，节点在等待一个随机的时间后再次检测。多数情况下(如

IEEE 802.11), 无线节点甚至在等待的时候也处于监听模式。然而, 无线设备即使在监听时的功耗也极大。因此, 在网络节点处于等待或不进行数据广播时应该关断无线电路。监听周期和等待周期都是 CSMA 的主要设计参数。

如果高层协议按 MAC 目标设计可进一步提高信道的接入率。例如, 某些传感器网络需要对传感器进行周期性的数据采样。如果应用层对采样间隔和采样顺序的相移进行动态调节, 那么进行周期性传输的大量节点便可有效共享无线信道。

考虑到设备的硬件成本限制, 传感器网络应用中难以采用 CSMA/冲突检测机制。不过可选择一种替代方案, CSMA 冲突回避(CA)是一种有效的冲突控制方法。然而, CSMA-CA 会给网络增加极大的额外通信量。如果没有直接的冲突控制方法, 数据链路层应采用错误控制方法以确保达到一定的传输成功率。事实证明, 带有应答握手信号的循环冗余校验等通用错误检测技术在传感器网络中十分有效。将数据链路层应答(节点对节点)和网络层应答(端对端)灵活地结合起来便可实现满足性能要求的传输成功率, 并达到期望的功耗水平。

## 3.2 网络层

对于传感器网, 路由协议设计是很具挑战性的。首先, 节点没有全球唯一的标识符, 传统的互联网路由协议无法应用在传感器网络中; 第二, 传感器网络中的所有节点都是源节点, 向唯一的节点 sink 发送数据; 第三, 由于在被测对象内部或附近部署了大量的节点, 它们采集到的数据是相同或相近的。这就需要路由协议具有数据融合能力, 以节约电能, 提高带宽利用率; 第四, 节点具备的处理能力, 电能和存储能力是很有限的, 需要强大的资源管理和任务调度能力。

综上, 传感器网络的路由协议是与传统网络截然不同的。目前研究人员已经提出了多种路由算法。这些算法可以分为: 以数据为中心的协议和层次化协议。

### 3.2.1 以数据为中心的路由协议

在这类协议中, sink 节点向特定区域的节点发出查询命令。该区域内的节点收到查询命令后, 向 sink 节点发送数据。

#### 1. Flooding 与 Gossiping

它们是传感器网络应用最早最简单的路由协议, 不需要任何路由算法, 也不需要维护网络拓扑结构。在泛洪协议(Flooding)中, 节点向它的所有邻居节点广播接收到的数据, 如

此反复，直到数据达到目的节点或者达到数据报的最大跳数。这个协议存在的问题是内爆（implosion）和重叠（overlap）。内爆是由于不同节点向同一节点发送相同数据引起的，见图 3；重叠是由于检测同一区域的节点向相同节点发送数据引起的，见图 4。针对泛洪的内爆问题，S.Hedetniemi[5]等人提出了 Gossiping 协议，节点随机选择一个邻居节点转发分组，而不是向所有邻居节点转发数据。但是协议增加了端到端的数据传输延迟。

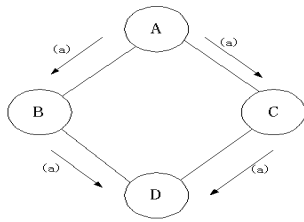


图3 内爆

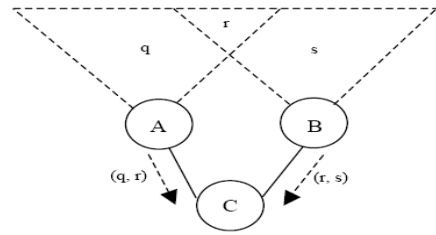


图 4 重叠

## 2. SPIN (sensor protocol for information via negotiation)[6]

SPIN 是以数据为中心的路由协议，通过协商机制来解决泛洪算法中的“内爆”和“重叠”问题。传感器节点仅广播采集数据的描述信息，当有相应的请求时，才有目的地发送数据信息。SPIN 协议中有 3 种类型的消息，即 ADV、REQ 和 DATA。节点用 ADV 宣布有数据发送，REQ 请求表示希望接收数据，用 DATA 封装数据。

SPIN 协议的扩展性差；功耗在所有节点之间分布不均衡，sink 节点附近的节点首先耗尽电能。

## 3. 定向扩散（Directed Diffusion）[7]

定向扩散模型是 Estrin 等人专门为传感器网络设计的路由策略，与已有的路由算法有着截然不同的实现机制。节点用一组属性值来命名它所生成的数据，比如将温度传感器生成的数据命名为 Type=temperature, id=12, timestamp=02.01.22/21:10:23, location=305。Sink 节点发出的查询业务也用属性的组合表示，逐级扩散，最终遍历全网，找到所有匹配的原始数据。有一个称为“梯度”的变量与整个业务请求的扩散过程相联系，反映了网络中间节点对匹配请求条件的数据源的近似判断。更直接的方法是节点用一组标量值表示它的选择，值越大意味着向该方向继续搜索获得匹配数据的可能性越大。这样的处理最终将会在整个网络中为 sink 节点的请求建立一个临时的“梯度”场。匹配数据可以沿“梯度”最大的方向中继回 sink 节点。

### 3.2.2 层次化路由协议

这类协议将所有的节点分为若干簇，每个簇选举一个首领。由首领实现数据融合，达到节约功耗的目的。簇的划分依据是节点现有的电量和它与首领的距离。LEACH 是最早提出的层次化协议，在它的基础之上又衍生出了许多类似协议。

#### 1. LEACH(Low Energy Adaptive Clustering Hierarch)[8]

LEACH 协议是由 MIT 的 Heinzelman 等人提出的。协议将所有节点分为若干簇，每个簇选举一个首领，簇首领还可以组成更高层次的簇，见图 5。簇首领接收本簇中节点发送的数据，实现数据融合功能，并向基站发送数据。由于向基站发送数据要消耗很大的电能，每隔一段时间需要重新选举首领，以保证功耗在所有节点的平均分配。该协议具有两个运行阶段：簇建立阶段和稳定运行阶段。为减少协议开销，稳定运行阶段的持续时间要长于簇建立阶段。

在簇建立阶段，将所有节点划分为若干簇，每个簇选举一个首领。每个节点选取一个介于 0 和 1 之间的随机数。如果这个数大于门限值  $T(n)$ ，该节点成为簇首领。门限值计算方法如下：

$$T_{(n)} = \begin{cases} \frac{P}{1 - P * [r \bmod (1/P)]} & \text{if } n \in G \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

其中  $p$  是首领节点占全部节点的百分数； $r$  是现在的轮次； $G$  是在最近  $1/p$  轮没有成为首领的节点集合。选举结束之后，新当选的首领节点向所有节点广播自己成为首领的消息。根据收到广播信号的强弱，每个节点决定加入哪个簇，并答复该簇的首领。

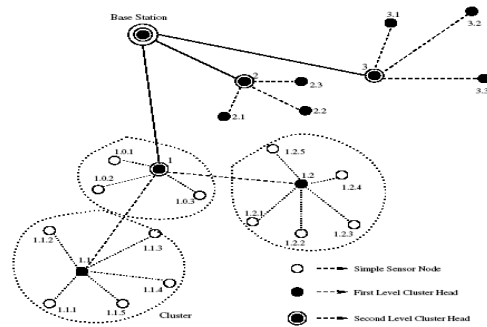


图 5 层次化模型

在稳定运行阶段，簇中的所有节点按照时分复用的方式向首领发送数据。每个节点发送一遍数据所用的时间称为帧时间。在持续工作一段时间之后，网络进入下一轮工作周期，重新划分簇并选举首领。

## 2. TEEN (threshold sensitive energy efficient sensor network protocol)

TEEN[9]协议对 LEACH 协议进行了改进，设立了两个软、硬两个门限值。只有在同时满足两个门限值时节点才发送数据。硬门限的初值由用户根据应用确定；软门限的初值为 0。当测量数据第一次达到硬门限时，节点在随后到来的时隙发送数据，并把它设为新的硬门限值。此后，只有当测量数据与硬门限的差值大于软门限时，节点才发送数据，并把这个差值设为新的软门限值。通过设定门限值，可以调节系统的测量精度和功耗。

## 4 传感器网络的应用研究

传感器网络有着巨大的应用前景，被认为是将对 21 世纪产生巨大影响力的技术之一。已有和潜在的传感器应用领域包括：军事侦察、环境监测、医疗、建筑物监测等等。随着传感器技术、无线通信技术、计算技术的不断发展和完善，各种传感器网络将遍布我们生活环境，从而真正实现“无处不在的计算”。以下简要介绍传感器网络的一些应用。

### 军事应用

传感器网络研究最早起源于军事领域，实验系统有海洋声纳监测的大规模传感器网络，也有监测地面物体的小型传感器网络。现代传感器网络应用中，通过飞机撒播、特种炮弹发射等手段，可以将大量便宜的传感器密集地撒布于人员不便于到达的观察区域如敌方阵地内，收集到有用的微观数据；在一部分传感器因为遭破坏等原因失效时，传感器网络作为整



体仍能完成观察任务。传感器网络的上述特点使得它具有重大军事价值，可以应用于如下一些场景中：

- 监测人员、装备等情况以及单兵系统：通过在人员、装备上附带各种传感器，可以让各级指挥员比较准确、及时地掌握己方的保存状态。通过在敌方阵地部署各种传感器，可以了解敌方武器部署情况，为己方确定进攻目标和进攻路线提供依据。
- 监测敌军进攻：在敌军驻地和可能的进攻路线上部署大量传感器，从而及时发现敌军的进攻行动、争取宝贵的应对时间。并可根据战况快速调整和部署新的传感器网络。
- 评估战果：在进攻前后，在攻击目标附近部署传感器网络，从而收集目标被破坏程度的数据。
- 核能、生物、化学攻击的侦察：借助于传感器网络可以及早发现己方阵地上的生、化污染，提供快速反应时间从而减少损失。不派人员就可以获取一些核、生、化爆炸现场的详细数据。

## 环境应用

应用于环境监测的传感器网络，一般具有部署简单、便宜、长期不需更换电池、无需派人现场维护的优点。通过密集的节点布置，可以观察到微观的环境因素，为环境研究和环境监测提供了崭新的途径[10]。

传感器网络研究在环境监测领域已经有很多的实例。这些应用实例包括：对海岛鸟类生活规律的观测；气象现象的观测和天气预报；森林火警；生物群落的微观观测等[11]。

- 洪灾的预警：通过在水坝、山区中关键地点合理地布置一些水压、土壤湿度等传感器，可以在洪灾到来之前发布预警信息，从而及时排除险情或者减少损失[12]。
- 农田管理：通过在农田部署一定密度的空气温度、土壤湿度、土壤肥料含量、光照强度、风速等传感器，可以更好地对农田管理微观调控，促进农作物生长[13]。

## 医疗应用

传感器网络在医疗领域也有一些成功实例。SSIM (Smart Sensors and Integrated Microsystems)项目中, 100 个微型传感器被植入病人眼中[14], 从而帮助盲人获得了一定程度的视觉。

借助于各种医疗传感器网络, 人们可以享受到更方便更舒适的医疗服务[15], 比如:

- 远程健康监测: 通过在老年人身上佩戴一些血压、脉搏、体温等微型无线传感器, 并通过住宅内的传感器网关, 医生可以从医院里远程了解这些老年人的健康状况。通过这种方法, 还可以对一些冠心病、脑溢血等高危病人进行 24 小时健康检测, 而不妨碍病人的日常起居和生活质量。
- 病变器官观察: 通过在人体器官中植入一些微型传感器, 随时观测器官的生理状态, 可以发现器官的功能恶化, 及时采取治疗措施从而挽救病人生命。但是推广这种想法前, 还需要突破许多技术瓶颈, 这些医疗传感器必须非常安全; 工作能源要从人体自动获取; 系统稳定、基本不需维修。

## 建筑及城市管理

各种无线传感器可以灵活方便地布置于建筑物内, 获取室内环境参数, 从而为居室环境控制和危险报警提供依据。

- 智能家居: 通过布置于房间内的温度、湿度、光照、空气成分等无线传感器, 感知居室不同部分的微观状况, 从而对空调、门窗以及其他家电进行自动控制, 提供给人们智能、舒适的居住环境[16]。
- 建筑安全: 通过布置于建筑物内的图像、声音、气体检测、温度、压力、辐射等传感器, 发现异常事件及时报警, 自动启动应急措施。
- 智能交通: 通过布置于道路上的速度、识别传感器, 监测交通流量等信息, 为出行者提供信息服务, 发现违章能及时报警和记录[17]。

## 反恐和公共安全

通过特殊用途的传感器, 特别是生物化学传感器监测有害物、危险物的信息, 最大限度地减少其对人民群众生命安全造成的伤害。

## 5 结论

传感器网络是目前国内外的最新研究热点，具有广阔的应用前景。通过近几年的研究，人们对传感器网络固有特点的认识已经逐渐明确。但是，传感器网络要真正实用化，在基础层、网络层等方面都有许多基础性问题 and 关键技术需要解决。同时我们认为，由于应用的多样性，传感器网络研究在兼顾通用性的同时，必须进行面向应用的、具有系统针对性的研究，以提高执行效率。目前最迫切的工作是对传感器网络进行科学分类，在此基础之上展开针对性研究，进而根据各种应用特点，设计出高效率的系统，充分发挥传感器网络的潜能。

## 参考文献

- [1] Vieira, M.A.M.; Coelho, C.N., Jr.; da Silva, D.C., Jr.; da Mata, J.M.;  
“Survey on wireless sensor network devices” *Emerging Technologies and  
Factory Automation, 2003. Proceedings. ETFA '03. IEEE Conference*, Volume:  
1, 16-19 Sept. 2003 Pages:537 - 544 vol.1
- [2] S. Tilak, N.B. Abu-Ghazaleh, and W. Heinzelman. “Infrastructure Tradeoff  
for Sensor Networks” *WSNA02*, September 28, Atlanta, Georgia. 2002.
- [3] Akyildiz, I.F.; Weilian Su; Sankarasubramaniam, Y.; Cayirci, E.; “A survey  
on sensor networks” *Communications Magazine*, IEEE, Volume: 40, Issue:  
8, Aug. 2002 Pages:102 - 114
- [4] <http://robotics.eecs.berkeley.edu/~pister/SmartDust/>
- [5] Hedetniemi S, Liestman A. A survey of gossiping and broadcasting in  
communication networks. *Networks*, 1988, 18(4):319~349.
- [6] W. R. Heinzelman, J. Kulik, and H. Balakrishnan, “Adaptive Protocols for  
Information Dissemination in Wireless Sensor Networks,” *Proc. ACM  
MobiCom '99*, Seattle, WA, 1999, pp. 174 - 85.
- [7] C. Intanagonwiwat, R. Govindan, D. Estrin, “Directed Diffusion: A Scalable  
and Robust Communication Paradigm for Sensor Networks,” *ACM MobiCOM 2000*.
- [8] W. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, “Energy-efficient

- communication protocol for wireless sensor networks,” in the *Proceeding of the Hawaii International Conference System Sciences*, Hawaii, January 2000 , pp 1–10
- [9] A. Manjeshwar and D.P. Agrawal. TEEN: a Routing Protocol *for enhanced efficiency* In wireless sensor networks *Parallel and Distributed Processing Symposium.*, *Proceedings 15th International* , 23–27 April 2001.
- [10] Tarik Arici and Yucel Altunbasak, “Adaptive Sensing for Environment Monitoring using Wireless Sensor Networks,” in *Proc. IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, Atlanta, GA, March 2004
- [11] Alan Mainwaring, David Culler, Joseph Polastre, Robert Szewczyk, John Anderson “Wireless Sensor Networks for Habitat Monitoring” Proceedings of the 1st ACM international workshop on Wireless sensor networks and applications (September 2002)
- [12] <http://www.alertsystems.org>
- [13] K. A. Delin and S. P. Jackson, “The sensor web: A new instrument comcept” , SPIE’ s Symposium on Integrated Optics, 20–26, Jan. 2001 San Jose
- [14] Loren Schwiebert, Sandeep K. S. Gupta, and Jennifer Weinmann. “Research challenges in wireless networks of biomedical sensors” . In *Mobile Computing and Networking*, pages 151–165, 2001.
- [15] Korhonen, J. Parkka and M. Van GILS, “Health monitoring in the home of the future”, IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine May 66-73 2003
- [16] S. Meyer and A. Rakotonirainy. “A Survey of Research on Context-Aware Homes.” Workshop on Wearable, Invisible, Context-Aware, Ambient, Pervasive and Ubiquitous Computing, Adelaide, Astralia. 2003
- [17] N. Knaian, “A wireless sensor network for smart roadbeds and intelligent transportation systems” MSc thesis, MIT 2000

作者: **李天璞** 中国科学院计算技术研究所信息网络室 博士研究生  
**鞠海玲** 中国科学院计算技术研究所信息网络室 博士研究生  
**崔 莉** 中国科学院计算技术研究所信息网络室 研究员、博导