

无线传感器网络*

任丰原¹⁺, 黄海宁², 林闯¹

¹(清华大学 计算机科学与技术系,北京 100084)

²(中国科学院 声学研究所,北京 100080)

Wireless Sensor Networks

REN Feng-Yuan¹⁺, HUANG Hai-Ning², LIN Chuang¹

¹(Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

²(Institute of Acoustics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

+ Corresponding author: Phn: 86-10-62783596, Fax: 86-10-62771138, E-mail: renfy@csnet1.cs.tsinghua.edu.cn

<http://www.cs.tsinghua.edu.cn/>

Received 2002-10-21; Accepted 2003-03-11

Ren FY, Huang HN, Lin C. Wireless sensor networks. *Journal of Software*, 2003,14(7):1282~1291.

<http://www.jos.org.cn/1000-9825/14/1282.htm>

Abstract: Sensor network, which is made by the convergence of sensor, micro-electro-mechanism system and networks technologies, is a novel technology about acquiring and processing information. In this paper, the architecture of wireless sensor network is briefly introduced. Next, some valuable applications are explained and forecasted. Combining with the existing work, the hot spots including power-aware routing and media access control schemes are discussed and presented in detail. Finally, taking account of application requirements, several future research directions are put forward.

Key words: sensor network; low power; routing technology

摘要: 集成了传感器、微机电系统和网络三大技术而形成的传感器网络是一种全新的信息获取和处理技术。在简要介绍传感器网络体系结构的基础上,分析和展望了一些有价值的应用领域。结合已有研究,总结并详细阐述了包括低功耗路由技术和介质访问控制方法等在内的热点研究问题。最后,针对应用需求,提出了几点研究设想。

关键词: 传感器网络;低功耗;路由技术

中图法分类号: TP393 文献标识码: A

更小、更廉价的低功耗计算设备代表的“后 PC 时代”冲破了传统台式计算机和高性能服务器的设计模式;普遍的网络化带来的计算处理能力是难以估量的;微机电系统(micro-electro-mechanism system,简称 MEMS)的

* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant No.60273009 (国家自然科学基金); the National High-Tech Research and Development Plan of China under Grant No.2001AA112080 (国家高技术研究发展计划(863)); the National Grand Fundamental Research 973 Program of China under Grant No.G1999032707 (国家重点基础研究发展规划(973))

第一作者简介: 任丰原(1970—),男,甘肃临洮人,博士,讲师,主要研究领域为网络流量管理与控制,传感器网络,系统性能评价。

迅速发展奠定了设计和实现片上系统(system on chip,简称 SOC)的基础.以上 3 方面的高度集成又孕育出了许多新的信息获取和处理模式,传感器网络就是其中一例.

随机分布的集成有传感器、数据处理单元和通信模块的微小节点通过自组织的方式构成网络,借助于节点中内置的形式多样的传感器测量所在周边环境中的热、红外、声纳、雷达和地震波信号,从而探测包括温度、湿度、噪声、光强度、压力、土壤成分、移动物体的大小、速度和方向等众多我们感兴趣的物质现象.在通信方式上,虽然可以采用有线、无线、红外和光等多种形式,但一般认为短距离的无线低功率通信技术最适合传感器网络使用,为明确起见,一般称作无线传感器网络.但也不绝对,Berkeley 的 Smart Dust^[1]因为可以像尘埃一样悬浮在空中,有效地避免了障碍物的遮挡,因此采用光作为通信介质.

无线传感器网络与传统的无线网络(如 WLAN 和蜂窝移动电话网络)有着不同的设计目标,后者在高度移动的环境中通过优化路由和资源管理策略最大化带宽的利用率,同时为用户提供一定的服务质量保证.在无线传感器网络中,除了少数节点需要移动以外,大部分节点都是静止的.因为它们通常运行在人无法接近的恶劣甚至危险的远程环境中,能源无法替代,设计有效的策略延长网络的生命周期成为无线传感器网络的核心问题.当然,从理论上讲,太阳能电池能持久地补给能源,但工程实践中生产这种微型化的电池还有相当的难度.在无线传感器网络的研究初期,人们一度认为成熟的 Internet 技术加上 Ad-hoc 路由机制对传感器网络的设计是足够充分的,但深入的研究表明^[2]:传感器网络有着与传统网络明显不同的技术要求.前者以数据为中心,后者以传输数据为目的.为了适应广泛的应用程序,传统网络的设计遵循着“端到端”的边缘论思想^[3],强调将一切与功能相关的处理都放在网络的端系统上,中间节点仅仅负责数据分组的转发,对于传感器网络,这未必是一种合理的选择.一些为自组织的 Ad-hoc 网络设计的协议和算法未必适合传感器网络的特点和应用的要求.节点标识(如地址等)的作用在传感器网络中就显得不是十分重要,因为应用程序不怎么关心单节点上的信息;中间节点上与具体应用相关的数据处理、融合和缓存也显得很有必要.在密集性的传感器网络中,相邻节点间的距离非常短,低功耗的多跳通信模式节省功耗,同时增加了通信的隐蔽性,也避免了长距离的无线通信易受外界噪声干扰的影响.这些独特的要求和制约因素为传感器网络的研究提出了新的技术问题.

1 传感器网络的体系结构

1.1 节点组成

在不同应用中,传感器网络节点的组成不尽相同,但一般都由数据采集、数据处理、数据传输和电源这 4 部分组成.被监测物理信号的形式决定了传感器的类型.处理器通常选用嵌入式 CPU,如 Motorola 的 68HC16,ARM 公司的 ARM7 和 Intel 的 8086 等.数据传输单元主要由低功耗、短距离的无线通信模块组成,比如 RFM 公司的 TR1000 等.因为需要进行较复杂的任务调度与管理,系统需要一个微型化的操作系统,UC Berkeley 为此专门开发了 TinyOS^[4],当然,uCOS-II 和嵌入式 Linux 等也是不错的选择.图 1 描述了节点的组成,其中实心箭头的方向表示数据在节点中的流动方向.

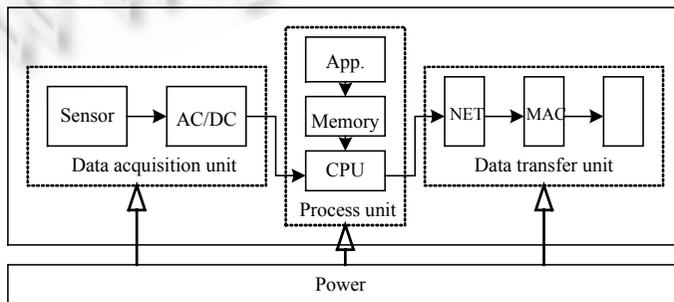


Fig.1 Components in node of sensor network
图 1 传感器网络节点的组成

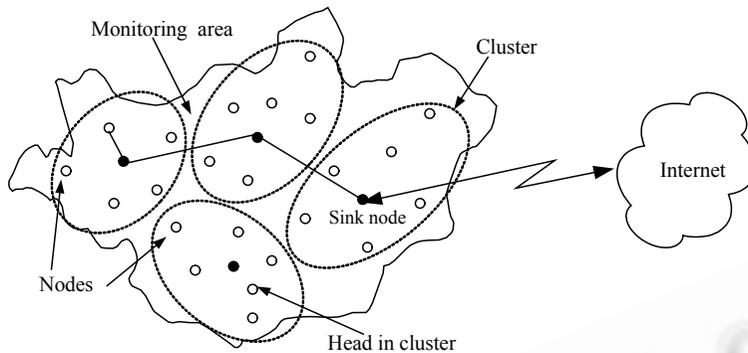


Fig.2 Architecture of sensor network

图2 传感器网络的体系结构

1.2 网络体系结构

在传感器网络中,节点任意散落在被监测区域内,这一过程是通过飞行器撒播、人工埋置和火箭弹射等方式完成的.节点以自组织形式构成网络,通过多跳中继方式将监测数据传到 sink 节点,最终借助长距离或临时建立的 sink 链路将整个区域内的数据传送到远程中心进行集中处理.卫星链路可用作 sink 链路,借助游弋在监测区上空的无人飞机回收 sink 节点上的数据也是一种方式,UC Berkeley 在进行 UAV(unmanned aerial vehicle)项目^[5]的外场测试时便采用了这种方式.如果网络规模太大,可以采用聚类分层的管理模式,图 2 给出了传感器网络体系结构一般形式的描述.

2 传感器网络的应用

MEMS 支持下的微小传感器技术和节点间的无线通信能力为传感器网络赋予了广阔的应用前景,主要表现在军事、环境、健康、家庭和其他商业领域.当然,在空间探索和灾难拯救等特殊的领域,传感器网络也有其得天独厚的技术优势.

2.1 军事应用

在军事领域,传感器网络将会成为 C4ISRT(command,control,communication,computing,intelligence,surveillance,reconnaissance and targeting)系统不可或缺的一部分.C4ISRT 系统的目标是利用先进的高科技技术,为未来的现代化战争设计一个集命令、控制、通信、计算、智能、监视、侦察和定位于一体的战场指挥系统,受到了军事发达国家的普遍重视.因为传感器网络是由密集型、低成本、随机分布的节点组成的,自组织性和容错能力使其不会因为某些节点在恶意攻击中的损坏而导致整个系统的崩溃,这一点是传统的传感器技术所无法比拟的,也正是这一点,使传感器网络非常适合应用于恶劣的战场环境中,包括监控我军兵力、装备和物资,监视冲突区,侦察敌方地形和布防,定位攻击目标,评估损失,侦察和探测核、生物和化学攻击.在战场,指挥员往往需要及时准确地了解部队、武器装备和军用物资供给的情况,铺设的传感器将采集相应的信息,并通过汇聚节点将数据送至指挥所,再转发到指挥部,最后融合来自各战场的的数据形成我军完备的战区态势图.在战争中,对冲突区和军事要地的监视也是至关重要的,通过铺设传感器网络,以更隐蔽的方式近距离地观察敌方的布防;当然,也可以直接将传感器节点撒向敌方阵地,在敌方还未来得及反应时迅速收集利于作战的信息.传感器网络也可以为火控和制导系统提供准确的目标定位信息.在生物和化学战中,利用传感器网络及时、准确地探测爆炸中心将会为我军提供宝贵的反应时间,从而最大可能地减小伤亡.传感器网络也可避免核反应部队直接暴露在核辐射的环境中.在军事应用中,与独立的卫星和地面雷达系统相比,传感器网络的潜在优势表现在以下几个方面:

(1) 分布节点中多角度和多方位信息的综合有效地提高了信噪比,这一直是卫星和雷达这类独立系统难以克服的技术问题之一.

- (2) 传感器网络低成本、高冗余的设计原则为整个系统提供了较强的容错能力.
- (3) 传感器节点与探测目标的近距离接触大大消除了环境噪声对系统性能的影响.
- (4) 节点中多种传感器的混合应用有利于提高探测的性能指标.
- (5) 多节点联合,形成覆盖面积较大的实时探测区域.
- (6) 借助于个别具有移动能力的节点对网络拓扑结构的调整能力,可以有效地消除探测区域内的阴影和盲点.

2.2 环境科学

随着人们对于环境的日益关注,环境科学所涉及的范围越来越广泛.通过传统方式采集原始数据是一件困难的工作.传感器网络为野外随机性的研究数据获取提供了方便,比如,跟踪候鸟和昆虫的迁移,研究环境变化对农作物的影响,监测海洋、大气和土壤的成分等.ALERT^[6]系统中就有数千传感器来监测降雨量、河水水位和土壤水分,并依此预测爆发山洪的可能性^[7].类似地,传感器网络对森林火灾准确、及时地预报也应该是有帮助的.此外,传感器网络也可以应用在精细农业中,以监测农作物中的害虫、土壤的酸碱度和施肥状况等.

2.3 医疗健康

如果在住院病人身上安装特殊用途的传感器节点,如心率和血压监测设备,利用传感器网络,医生就可以随时了解被监护病人的病情,进行及时处理^[8].还可以利用传感器网络长时间地收集人的生理数据,这些数据在研制新药品过程中是非常有用的,而安装在被监测对象身上的微型传感器也不会给人的正常生活带来太多的不便.此外,在药物管理等诸多方面,它也有新颖而独特的应用.总之,传感器网络为未来的远程医疗提供了更加方便、快捷的技术实现手段.

2.4 空间探索

探索外部星球一直是人类梦寐以求的理想,借助于航天器布撒的传感器网络节点实现对星球表面长时间的监测,应该是一种经济可行的方案.NASA的JPL(Jet Propulsion Laboratory)实验室研制的Sensor Webs^[9]就是为将来的火星探测进行技术准备的,已在佛罗里达宇航中心周围的环境监测项目中进行测试和完善.

2.5 其他商业应用

自组织、微型化和对外部世界的感知能力是传感器网络的三大特点,这些特点决定了传感器网络在商业领域应该也会有不少的机会.比如,嵌入家具和家电中的传感器与执行机构组成的无线网络与Internet连接在一起将会为我们提供更加舒适、方便和具有人性化的智能家居环境;文献[10]中描述的城市车辆监测和跟踪系统中成功地应用了传感器网络;德国某研究机构正在利用传感器网络技术为足球裁判研制一套辅助系统,以减小足球比赛中越位和进球的误判率.此外,在灾难拯救、仓库管理、交互式博物馆、交互式玩具、工厂自动化生产线等众多领域,无线传感器网络都将会孕育出全新的设计和应用模式^[11].

3 传感器网络研究中的热点问题

到现在为止,传感器网络的研究大致经过了两个阶段.第1阶段主要偏重利用MEMS技术设计小型化的节点设备,代表性的研究项目有WINS^[12]和Smart Dust.对于网络本身问题的关注和研究可以认为是传感器网络研究的第2个阶段,目前正在成为无线网络研究领域的一个不小的热点.从网络分层模型的角度分析,每一层都需要结合传感器网络的特点进行细致研究的问题,就已有的研究而言,主要集中在网络层和链路层.下面我们就其中需要解决的问题和已有的方案进行归纳总结.

3.1 网络层

传感器网络中的路由协议分为平面型和层次型两种,但大都采用多跳形式在节点和易移动的sink节点之间建立连接.Ad-hoc网络中已有的多跳路由协议,如AODV(Ad-hoc demand distance vector)和TORA(temporally ordered routing algorithm)等,一般都不适合传感器网络的特点和要求.传感器中的大部分节点不像Ad-hoc网络

中的节点一样快速移动,因此没有必要花费很大的代价频繁地更新路由表信息.

3.1.1 平面路由协议

(1) Flooding

泛洪是一种传统的路由技术,不要求维护网络的拓扑结构,并进行路由计算,接收到消息的节点以广播形式转发分组.对于自组织的传感器网络,泛洪路由是一种较直接的实现方法,但消息的“内爆”(implosion)和“重叠”(overlap)是其固有的缺陷^[13].为了克服这些缺陷,S.hedetniemi等人提出了 Gossiping 策略^[13],节点随机选取一个相邻节点转发它接收到的分组,而不是采用广播形式.这种方法避免了消息的“内爆”现象,但有可能增加端端的传输延时.

(2) SPIN (sensor protocol for information via negotiation)^[14]

SPIN 是以数据为中心的自适应路由协议,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,用 REQ 请求希望接收数据,用 DATA 封装数据.SPIN 协议有 4 种不同的形式:

- SPIN-PP.采用点到点的通信模式,并假定两节点间的通信不受其他节点的干扰,分组不会丢失,功率没有任何限制.要发送数据的节点通过 ADV 向它的相邻节点广播消息,感兴趣的节点通过 REQ 发送请求,数据源向请求者发送数据.接收到数据的节点再向它的相邻节点广播 ADV 消息,如此重复,使所有节点都有机会接收到任何数据.

- SPIN-EC.在 SPIN-PP 的基础上考虑了节点的功耗,只有能够顺利完成所有任务且能量不低于设定阈值的节点才可参与数据交换.

- SPIN-BC.设计了广播信道,使所有在有效半径内的节点可以同时完成数据交换.为了防止产生重复的 REQ 请求,节点在听到 ADV 消息以后,设定一个随机定时器来控制 REQ 请求的发送,其他节点听到该请求,主动放弃请求权利.

- SPIN-RL.它是对 SPIN-BC 的完善,主要考虑如何恢复无线链路引入的分组差错与丢失.记录 ADV 消息的相关状态,如果在确定时间间隔内接收不到请求数据,则发送重传请求,重传请求的次数有一定的限制.

(3) SAR (sequential assignment routing)^[15]

在选择路径时,有序分配路由(SAR)策略充分考虑了功耗、QoS 和分组优先权等特殊要求,采用局部路径恢复和多路径备份策略,避免节点或链路失败时进行路由重计算需要的过量计算开销.为了在每个节点与 sink 节点间生成多条路径,需要维护多个树结构,每个树以落在 sink 节点有效传输半径内的节点为根向外生长,枝干的选择需满足一定 QoS 要求并要有一定的能量储备.这一处理使大多数传感器节点可能同时属于多个树,可任选其一将采集数据回传到 sink 节点.

(4) 定向扩散(directed diffusion)^[2]

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,比如将地震波传感器生成的数据命名为 Type=seismic,id=12,timestamp=02.01.22/21:10:23,location=75-80S/100-120E.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.图 3 描述了定向扩散模型的工作原理.

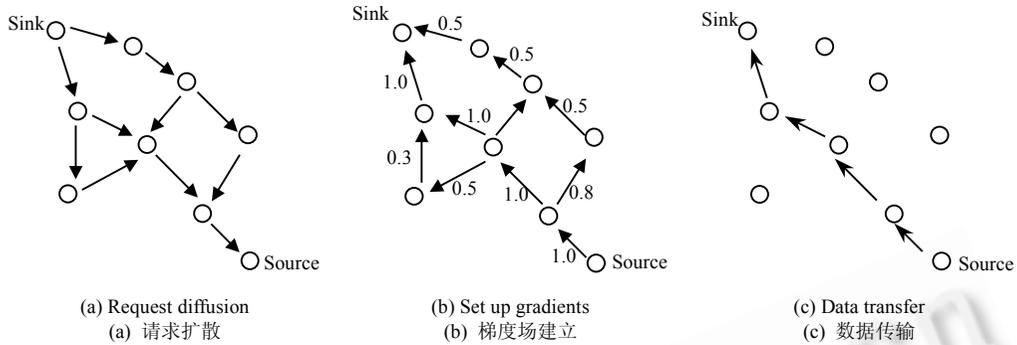


Fig.3 Principle of directed diffusion routing
图3 定向扩散路由原理

3.1.2 层次路由协议

(1) LEACH (low energy adaptive clustering hierarchy)^[16]

LEACH 是 MIT 的 Chandrakasan 等人为无线传感器网络设计的低功耗自适应聚类路由算法.与一般的平面多跳路由协议和静态聚类算法相比,LEACH 可以将网络生命周期延长 15%,主要通过随机选择聚类首领,平均分担中继通信业务来实现.LEACH 定义了“轮”(round)的概念,一轮由初始化和稳定工作两个阶段组成.为了避免额外的处理开销,稳定态一般持续相对较长的时间.

在初始化阶段,聚类首领是通过下面的机制产生的.传感器节点生成 0,1 之间的随机数,如果大于阈值 T ,则选该节点为聚类首领. T 的计算方法如下:

$$T = \frac{p}{1 - p[r \bmod (1/p)]},$$

其中 p 为节点中成为聚类首领的百分数, r 是当前的轮数.一旦聚类首领被选定,它们便主动向所有节点广播这一消息.依据接收信号的强度,节点选择它所要加入的组,并告知相应的聚类首领.基于时分复用的方式,聚类首领为其中的每个成员分配通信时隙.在稳定工作阶段,节点持续采集监测数据,传与聚类首领,进行必要的融合处理之后,发送到 sink 节点,这是一种减小通信业务量的合理工作模式.持续一段时间以后,整个网络进入下一轮工作周期,重新选择聚类首领.

(2) TEEN (threshold sensitive energy efficient sensor network protocol)^[17]

依照应用模式的不同,通常可以简单地将无线自组织网络(包括传感器网络和 Ad-hoc 网络)分为主动(proactive)和响应(reactive)两种类型.主动型传感器网络持续监测周围的物质现象,并以恒定速率发送监测数据;而响应型传感器网络只是在被观测变量发生突变时才传送数据.相比之下,响应型传感器网络更适合应用在敏感时间的应用中.TEEN 和 LEACH 的实现机制非常相似,只是前者是响应型的,而后者属于主动型传感器网络.在 TEEN 中定义了硬、软两个门限值,以确定是否需要发送监测数据.当监测数据第一次超过设定的硬门限时,节点用它作为新的硬门限,并在接着到来的时隙内发送它.在接下来的过程中,如果监测数据的变化幅度大于软门限界定的范围,则节点传送最新采集的数据,并将它设定为新的硬门限.通过调节软门限值的大小,可以在监测精度和系统能耗之间取得合理的平衡.NS2 平台上的仿真研究结果表明^[18]:TEEN 比 LEACH 更有效.

(3) PEGAGIS (power-efficient gathering in sensor information system)^[19]

PEGAGIS 由 LEACH 发展而来.它假定组成网络的传感器节点是同构且静止的.节点发送能量递减的测试信号,通过检测应答来确定离自己最近的相邻节点.通过这种方式,网络中的所有节点能够了解彼此的位置关系,进而每个节点依据自己的位置选择所属的聚类,聚类的首领参照位置关系优化出到 sink 节点的最佳链路.因为 PEGAGIS 中每个节点都以最小功率发送数据分组,并有条件完成必要的的数据融合,减小业务流量.因此,整个网络的功耗较小.研究表明,PEGAGIS 支持的传感器网络的生命周期是 LEACH 的近两倍.PEGAGIS 协议的不足之处在于节点维护位置信息(相当于传统网络中的拓扑信息)需要额外的资源.

(4) 多层聚类算法^[2]

多层聚类算法是 Estrin 为传感器网络设计的一种新的聚类实现机制.工作在网络中的传感器节点处于不同的层,所处层次越高,所覆盖面积越大.起初,所有节点均在最低层,通过竞争获得提升高层的机会.新的工作周期开始时,每一个节点都广播自己的状态信息,包括储备能量、所在层次和首领的 ID(如果有)等,然后进入等待状态以便相互了解信息,等待时间与所在层次成正比.处在最低层的节点如果没有首领,等待状态结束后,立刻启动一个“晋升定时器”,定时时间与自身能量以及接收到同层其他节点广播消息的数目成反比,目的是为能量较高且在密集区的节点获得较多的提升机会.一旦定时时间到,节点升入高层,将有发给自己广播消息的节点视为潜在的子节点,并广播自己新的状态信息,低层节点选择响应这些准首领的广播消息,最终确定惟一的通信关系.选择了首领的节点,自己的“晋升定时器”将停止工作,也就意味着本轮放弃了晋升机会.在每一个工作周期结束以后,高层节点将视自己的状态信息(如有无子节点,功率是否充足)决定是否让出首领位置.上述的多层聚类算法具有递归性,Estrin 等人用两层模型验证了它在传感器网络中的有效性.

3.2 链路层

链路层协议用于建立可靠的点到点或点到多点通信链路,主要由介质访问控制(MAC)组成.就实现机制而言,MAC 协议分 3 类:确定性分配、竞争占用和随机访问^[20].前两者不是传感器网络的理想选择.因为 TDMA 固定时隙的发送模式功耗过大,为了节省功耗,空闲状态应关闭发射机;竞争占用方案需要实时监测信道状态,也不是一种合理的选择;随机介质访问模式比较适合于无线传感网络的节能要求.

蜂窝电话网络、Ad-hoc 和蓝牙技术是当前主流的无线网络技术,但它们各自的 MAC 协议不适合无线传感器网络.GSM 和 CDMA 中的介质访问控制主要关心如何满足用户的 QoS 要求和节省带宽资源,功耗是第二位的;Ad-hoc 网络则考虑如何在节点具有高度移动性的环境中建立彼此间的链接,同时兼顾一定的 QoS 要求,功耗也不是其首要关心的;而蓝牙采用了主从式的星型拓扑结构,这本身就不适合传感器网络自组织的特点.

基于以上两个方面的原因,需要为传感器网络设计新的低功耗 MAC 协议.下面我们简单介绍几种已有的典型方案.

3.2.1 SMACS^[21]

SMACS 是分布式的 MAC 协议,无须任何局部或全局主节点的调度便能让传感器节点发现相邻节点,并安排合理信道占用时间.在具体实现中,相邻节点的发现和信道的分配是一起完成的,因此,当节点听到它所有的相邻节点时,也就意味着已经建立相应的通信子网,链路由固定频率、随机选择的时隙组成.SMACS 无须全网的时间同步机制,但在各子网内部保持同步是必要的.在竞争信道资源时,带延时的随机唤醒机制有效地减小了能量的损耗.SMACS 的缺点是时隙分配方案不够严密,属于不同子网的节点之间有可能永远得不到通信机会.

3.2.2 基于 CSMA 的介质访问控制^[22]

传统的载波侦听/多路访问(CSMA)机制不适合传感器网络的原因有二:其一,持续侦听信道的过量功耗;其二,倾向支持独立的点到点通信业务,这样容易导致临近网关的节点获得更多的通信机会,而抑制多跳业务流量,造成不公平.为了弥补这些缺陷,Woo 和 Culler 从两个方面对传统的 CSMA 进行了改进,以适应传感器网络的技术要求:(1) 采用固定时间间隔的周期性侦听方案节省功耗;(2) 设计自适应传输速率控制(adaptive transmission rate control,简称 ARC)策略,有针对性地抑制单跳通信业务量,为中继业务提供更多的服务机会,提高公平性.相似的工作还有 Wei Ye 等人设计的 SMAC(sensor media access control)协议^[23].它也是利用周期性侦听机制节省功耗,但没有考虑公平性问题,而是在 PAMAS(power aware multi-access protocol with signalling)^[24]的启发下,精简了用于同步和避免冲突的信令机制.以上两种基于 CSMA 改进的传感器网络 MAC 协议都在 TinyOS 微操作系统上进行了实现,并分别在 SmartDust^[5]硬件平台上进行了测试,比 802.11 标准定义的 MAC 协议节省了 1~5 倍的功耗,基本上可为传感器网络所用.

3.2.3 TDMA/FDMA 组合方案^[25]

Sohrabi 和 Pottie 设计的传感器网络自组织 MAC 协议是一种时分复用和频分复用的混合方案,具有一定的代表性.节点上维护着一个特殊的结构帧,类似于 TDMA 中的时隙分配表,节点据此调度它与相邻节点间的通信.FDMA 技术提供的多信道,使多个节点之间可以同时通信,有效地避免了冲突.只是在业务量较小的传感器

网络中,该组合协议的信道利用率较低,因为事先定义的信道和时隙分配方案限制了对空闲时隙的有效利用。

3.3 其他重要的热点问题

除了网络自身的问题以外,还有许多关键问题也引起了研究者广泛的兴趣,主要集中在两个方面,即如何从系统角度出发节省功耗以及与应用相关的共性技术。

3.3.1 系统节能策略

(1) 动态功率管理(dynamic power management,简称 DPM)^[26]

在多数传感器网络的应用中,监测事件具有很强的偶发性,节点上所有的工作单元没有必要时刻保持在正常的工作状态。处于沉寂状态,甚至完全关闭,必要时加以唤醒是一种有效的系统节能方案。传感器网络节点的主要功耗器件有处理器、内存、带 A/D 的传感器和无线收发单元。Sinhua 等人根据它们的状态组合的有效性,将整个节点分为 5 种工作状态,在嵌入式操作系统的支持下进行切换,既满足了功能的需要,又节省了功耗。

(2) 动态电压调度(dynamic voltage scheduling,简称 DVS)

在文献[27]中,由 C. Lm 等人提出的动态电压调度策略的主要原理是基于负载状态动态调节供电电压来减小系统功耗,并被应用到 PDA 之类的个人移动设备上。这启发我们将其应用到传感器网络中,提出了如图 4 所示的功率控制原理图。节点上的嵌入式操作系统负责调度来自不同任务队列的请求接受服务,并实时监测处理器的利用率和任务队列的长度,负载观测器依据这两个参数的序列值计算负载的标称值 w ,直流/直流变换器参照该值输出幅值为 A 的电压,支持处理器的正常工作。这构成了一个典型的闭环反馈系统,控制理论中成熟的方法可以为该系统中各个模块的设计提供有力的支持。

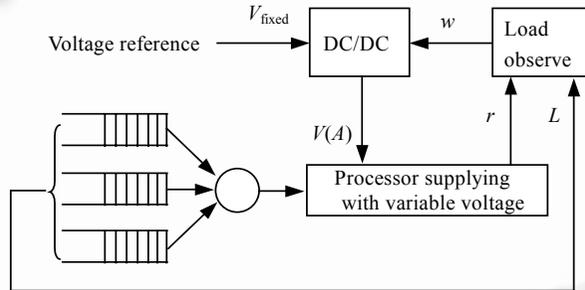


Fig.4 DVS power control principle

图 4 DVS 功率控制原理图

3.3.2 共性技术

在大多数传感器网络的应用中,诸如目标定位和时间同步等一些共性技术的支持是必不可少的,在军事应用中它们显得更为重要,因此,吸引了不少研究者的注意。

(1) 时钟同步

传感器网络中的通信协议和应用,比如基于 TDMA 的 MAC 协议和敏感时间的监测任务等,要求节点间的时钟必须保持同步。在文献[28]中,J. Elson 和 D. Estrin 给出了一种简单实用的同步策略。其基本思想是,节点以自己的时钟记录事件,随后用第三方广播的基准时间加以校正,精度依赖于对这段间隔时间的测量。这种同步机制应用在确定来自不同节点的监测事件的先后关系时有足够的精度。设计高精度的时钟同步机制是传感网络设计和应用中的一个技术难点。我们认为,考虑精简 NTP(network time protocol)协议的实现复杂度,将其移植到传感器网络中来应该是一个有价值的研究课题。

(2) 定位机制与算法

定位是大多数应用,特别是军事应用的基础。传感器网络中的定位机制与算法包括两部分:节点自身定位和外部目标定位,前者是后者的基础^[29]。在节点自身定位方面,DARPA 支持的一些有军事应用背景的项目,如 DSN(dynamic sensor network)^[30]和 SCADDS(scalable coordination architecture for deeply distributed and dynamic system)^[31]等,大多采用 GPS(global positioning system)技术。对于一些定位精度要求不高的项目,则应用了

LPS(local positioning system)^[32].由于GPS不适合中国的军事国情,我们设想了一种依赖于自己技术实现传感器网络中节点定位的机制,如图5所示.在“北斗一号”双星定位系统的支持下,传感器网络中的某些节点就可以找到自己的精确位置,然后参照此基准,利用局部定位算法,其他节点也可以正确定位.此外,在这种模式下,“北斗一号”的上行数据通路恰好可以作为传感器网络的 sink 链路,将数据回传给控制中心,省去了用飞行器等其他手段收集数据的麻烦.确定了节点的基准位置,利用传统的定位机制和算法,如接收信号的强弱、角度和时间等,以及典型的三角形算法,就可以定位外部目标,这是相对成熟的技术.

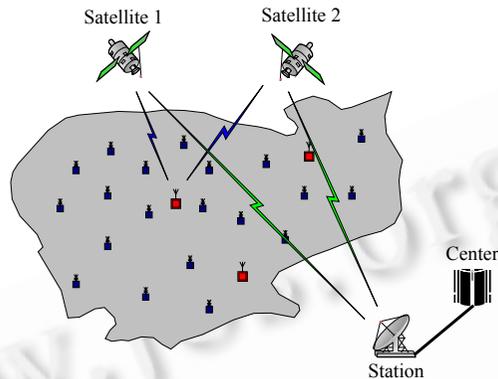


Fig.5 Principle diagram of position system using sensor nodes
图5 传感器节点定位系统原理图

4 结 论

普遍网络化孕育的传感器网络是一种新的信息获取和处理技术.在特殊领域,它有着传统技术不可比拟的优势,同时也必将开辟出不少新颖而有价值的商业应用.在本文中,我们归纳和总结了已有的研究,着重讨论了路由和介质访问控制等与网络密切相关的技术问题,并对一些可能的研究方向进行了简要的阐述,期望能借此推动国内对这一新兴的网络技术的关注与研究.

References:

- [1] Warneke B, Last M, Liebowitz B, Pister KSJ. Smart dust: Communicating with a cubic-millimeter computer. IEEE Computer Magazine, 2001,34(1):44~51.
- [2] Estrin D, Govindan R, Heidemann J, Kumar S. Next century challenges: Scalable coordinate in sensor network. In: Proceedings of the 5th ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking. Seattle: IEEE Computer Society, 1999, 263~270.
- [3] Saltzer J, Reed D, Clark D. End-to-End arguments in system design. ACM Transactions on Computer Systems, 1984,2(4):195~206.
- [4] TinyOS. <http://tinyos.millennium.berkeley.edu>.
- [5] Unmanned aerial vehicle (UAV). <http://www.eecs.berkeley.edu/~pister/29Palms0103/>.
- [6] ALERT. <http://www.alterssystem.org>.
- [7] Bonnet P, Gehrke J, Seshadri P. Querying the physical world. IEEE Personal Communication, 2000,7(5):10~15.
- [8] Noury N, Herve T, Rialle V, Virone G, Mercier E. Monitoring behavior in home using a smart fall sensor. In: Proceedings of the IEEE-EMBS Special Topic Conference on Microtechnologies in Medicine and Biology. Lyon: IEEE Computer Society, 2000. 607~610.
- [9] Sensor Webs. <http://sensorwebs.jpl.nasa.gov/>.
- [10] Shih E, Cho S, Ickes N, Min R, Sinha A, Wang A, Chandrakasan A. Physical layer driven protocol and algorithm design for energy-efficient wireless sensor networks. In: Proceedings of the ACM MobiCom 2001. Rome: ACM Press, 2001. 272~286.
- [11] Akyildiz I.F, Su W, Sankarasubramaniam Y, Cayirci E. Wireless sensor network: A survey. Computer Networks, 2002,38(4): 393~422.

- [12] Asada G, Dong M, Lin TS, Newberg F, Pottie G, Kaiser WJ, Marcy HO. Wireless integrated network sensors (WINS) for tactical information systems. In: Proceedings of the 1998 European Solid State Circuits Conference. New York: ACM Press, 1998. 15~20.
- [13] Heinzelman WR, Kulik J, Balakrishnan H. Adaptive protocols for information dissemination in wireless sensor networks. In: Proceedings of the ACM MobiCom'99. Seattle: ACM Press, 1999. 174~185.
- [14] Hedetniemi S, Liestman A. A survey of gossiping and broadcasting in communication networks. *Networks*, 1988,18(4):319~349.
- [15] Sohrabi K, Gao J, Ailawadhi V, Pottie GJ. Protocols for self-organization of a wireless sensor network. *IEEE Personal Communications*, 2000,7(5):16~27.
- [16] Heinzelman W, Chandrakasan A, Balakrishnan H. Energy efficient communication protocol for wireless microsensor networks. In: Proceedings of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences. Maui: IEEE Computer Society, 2000. 3005~3014.
- [17] Manjeshwar A, Agrawal DP. TEEN: A routing protocol for enhanced efficiency in wireless sensor networks. In: Proceedings of the 15th Parallel and Distributed Processing Symposium. San Francisco: IEEE Computer Society, 2001. 2009~2015.
- [18] Wireless sensor networks (WSN). <http://www.eecs.uc.edu/~njain/research.html>.
- [19] Lindsey S, Raghavendra CS. PEGASIS: Power-Efficient gathering in sensor information systems. <http://www.cs.wayne.edu/~loren/esc8220-info/menu.html>.
- [20] Sourabi K, Gao J, Ailawadni V, Pottie GJ. Protocols for self-organization of a wireless sensor network. *IEEE Personal Communications*, 2000,7(5):16~27.
- [21] Woo A, Culler D. A transmission control scheme for media access in sensor networks. In: Proceedings of the ACM MobiCom 2001. Rome: ACM Press, 2001. 221~235.
- [22] Shih E, Cho S, Ickes N, Min R, Sinha A, Wang A, Chandrakasan A. Physical layer driven protocol and algorithm design for energy-efficient wireless sensor networks. In: Proceedings of the ACM MobiCom 2001. Rome: ACM Press, 2001. 272~286.
- [23] Ye W, Heidemann J, Estrin D. An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor network. In: Proceedings of the INFOCOM 2002. San Francisco: IEEE Computer Society, 2002.
- [24] Singh S, Raghavendra CS. PAMAS: Power aware multi-access protocol with signaling for Ad hoc networks. *ACM Computer Communication Review*, 1998,28(3):5~26.
- [25] Sohrabi K, Pottie GJ. Performance of a novel self-organization protocol for wireless Ad hoc sensor networks. In: Proceedings of the IEEE 50th Vehicular Technology Conference. Amsterdam, 1999. 1222~1226.
- [26] Sinhua A, Chandrakasan A. Dynamic power management in wireless sensor network. *IEEE Design and Test of Computer*, 2001, 18(2):62~74.
- [27] Lm C, Kim H, Ha S. Dynamic voltage scheduling technique for low-power multimedia application using buffers. In: Proceedings of the International Symposium on Low Power Electronics and Design. California: ACM Portal Press, 2001. 34~39. <http://eeserver.korea.ac.kr/~bk21/arch/bk21conf/26.pdf>.
- [28] Elson J, Estrin D. Time synchronization for wireless sensor network. In: Proceedings of the 15th Parallel and Distributed Processing Symposium. San Francisco: IEEE Computer Society, 2001. 1965~1970.
- [29] Savarese C, Rabaey J. Locationing in distributed Ad-hoc wireless sensor network. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP) 2001. http://bwrc.eecs.berkeley.edu/Publications/2001/Locatng_distrb_ad-hoc_wrlss_snsr_ntwks/icassp2001_final.pdf.
- [30] Dynamic sensor network (DSN). <http://www.east.isi.edu/projects/DSN/>.
- [31] Scalable coordination architecture for deeply distributed and dynamic system (SCADDS). <http://www.isi.edu/scadds/>.
- [32] Werb J, Lanzl C. Designing a positioning system for finding things and people in indoors. *IEEE Spectrum*, 1998,35(9):71~78.