

无线传感器网络在设施农业中的应用进展

高峰¹, 卢尚琼², 徐青香¹, 姜庆臣¹

(1. 浙江农林大学 现代教育技术中心, 浙江 临安 311300; 2. 浙江农林大学 图书馆, 浙江 临安 311300)

摘要: 探索无线传感器网络在设施农业中的应用, 研制基于无线传感器网络的设施农业环境监控系统, 已经成为研究热点。提出了基于无线传感器网络的设施农业环境监控系统的基本结构, 对国内外相关典型应用成果进行了评述, 对目前存在的主要问题进行了剖析, 同时提出了未来的努力方向。目前, 基于无线传感器网络的设施农业环境监控系统还存在诸多问题, 包括感知网络的功能性问题、传感器的即插即用问题、无线传感器网络与广域网的互连问题、上位机软件的功能性问题、传感器节点的功耗问题、监控系统的安全性问题等。未来需要解决这些问题, 以进一步提高基于无线传感器网络的设施农业环境监控系统的自动化、智能化程度, 使之满足设施农业应用的实际需要。图 2 表 1 参 33

关键词: 无线传感器网络; 设施农业; 监控系统; 体系结构; 应用进展

中图分类号: TP273, S126 文献标志码: A 文章编号: 1000-5692(2010)05-0762-08

Wireless sensor networks and its application in facility agriculture

GAO Feng¹, LU Shang-qiong², XU Qing-xiang¹, JIANG Qing-chen¹

(1. Center of Modern Educational Technology, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China;

2. Library, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China)

Abstract: Exploring the applications of wireless sensor networks (WSN) in facility agriculture and developing the WSN-based monitoring systems for facility agriculture environment has become a hot research topic. In this research, the general architecture of the WSN-based monitoring system for facility agriculture environment was put forward, the typical application results at home and abroad were reviewed, the main drawbacks of these monitoring systems were analyzed, and the directions for future work were pointed out. The existing WSN-based monitoring systems for facility agriculture environment had many disadvantages in the functionality of sensor networks, the sensors plug-and-play, the interconnection between WSN and wide area networks (WAN), the functionality of the host-computer, the power consumption of sensor nodes, and the security of the monitoring system. These problems should be solved to further enhance the automation and intelligence level of the WSN-based monitoring system for facility agriculture environment, and meet the actual needs of facility agriculture applications. [Ch, 2 fig. 1 tab. 33 ref.]

Key words: wireless sensor networks; facility agriculture; monitoring system; architecture; application progress

设施农业的核心是对设施内部环境能够有效调控, 营造适于生物生长发育及农产品储藏保鲜的最佳环境条件^[1-4]。因此, 研究、设计并开发设施农业环境监控系统具有重要的理论意义和应用价值。传统设施农业环境监控系统主要采用有线通信技术(串行总线技术、现场总线技术等)进行通信。这种

收稿日期: 2009-11-20; 修回日期: 2010-03-22

基金项目: 浙江省科技支撑和引导计划面上项目(2008C22G2100030); 浙江农林大学科研发展基金资助项目(2351001090)

作者简介: 高峰, 副教授, 博士, 从事无线传感器网络、网络控制系统分析与设计、智能控制等研究。E-mail: gaofeng@zafu.edu.cn

系统虽然具有设备互操作性好、抗干扰能力强等优点, 但存在稳定性差、可靠性低、部署困难、扩展不灵活、安装及运行维护成本高等不足^[5-8], 从而极大地限制了其在设施农业领域中的推广应用。无线传感器网络(wireless sensor networks, WSN)是一种无中心节点的全分布式系统。通过随机投放的方式, 众多传感器节点被密集部署于监控区域。各传感器节点集成有传感器模块、控制器模块、通信模块和电源模块等, 它们以无线通信方式, 通过分层的网络通信协议和分布式算法, 可自组织地快速构建网络系统, 传感器节点间具有良好的协作能力; 借助于其集成的形式多样的传感器, 传感器节点可探测包括温度、湿度、噪声、光照度、压力、移动物体的大小、速度与方向等诸多人们感兴趣的物理现象; 通过网关, 无线传感器网络可以接入 Internet/Intranet, 从而将采集到的信息回传给远程的终端用户。这些特性使得无线传感器网络的应用范围非常广泛, 遍及国防军事、环境监测、城市管理、太空探索、医疗卫生、智能楼宇、交通运输、灾难预警与救助、仓储/物流管理等诸多领域^[9-12]。在设施农业领域, 也有着得天独厚的优势^[5-8, 13]: 基于无线传感器网络的设施农业环境监控系统具有精度高、能耗小、经济性好、安装方便、扩展灵活、稳定性与可靠性强等优点, 可以有效克服传统设施农业环境监控系统的各种缺陷, 实现设施环境(空气温度、空气湿度、光照度、二氧化碳浓度、土壤温度、土壤湿度、土壤电导率等)的实时、精确、远程和自动监控, 满足设施农业的应用需求。因此, 国内外众多大学和研究机构对它产生了极其浓厚的兴趣, 越来越多的科学家和学者纷纷加入到该研究行列, 研究成果日益丰富。笔者对无线传感器网络在设施农业中的应用进展进行综述, 主要内容有: 提出了基于无线传感器网络的设施农业环境监控系统的基本结构, 对国内外具有代表性的相关研究成果进行了评述, 对存在的主要问题进行了剖析, 提出了解决问题的基本思路。

1 基于无线传感器网络的设施农业环境监控系统的体系结构

虽然针对具体应用, 可能为基于无线传感器网络的设施农业环境监控系统设计特定的体系结构, 但在本质上, 基于无线传感器网络的设施农业环境监控系统通常具有如图 1 所示的结构^[5-8, 13-14]。

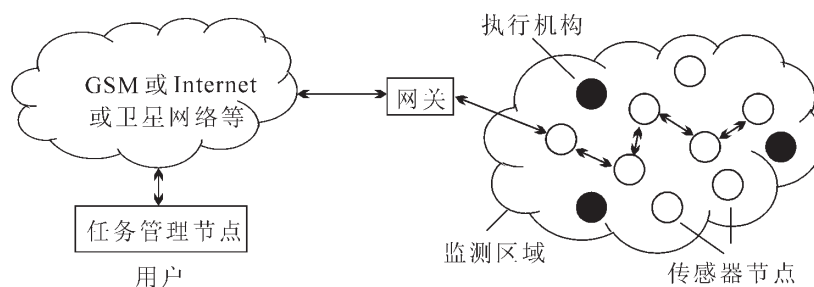


图 1 基于无线传感器网络的设施农业环境监控系统的基本结构

Figure 1 Basic structure of WSN-based monitoring system for facility agriculture environment

其典型工作方式: 大量传感器节点随机布设在监测区域内, 节点之间通过自组织的方式快速形成一个感知网络(即 WSN)。在感知网络内部, 每个传感器节点既是信息的采集者和发送者, 又是信息的路由者。传感器节点所探测到的信息(传感数据), 以多跳中继的方式, 将其传送给网关。当感知网络与管理及用户网络距离较远时, 为了实现它们之间的相互通信, 通常需要借助广域网(如 Internet、全球通、卫星网等)进行互联。网关充当感知网络与广域网之间通信的桥梁。这样, 当传感数据传送到网关后, 网关将传感数据经广域网传送给用户所在的任务管理节点。任务管理节点中运行着上位机管理软件, 在接收到传感数据后, 上位机管理软件的专家系统模块结合接收到的传感数据、各类知识库, 形成控制决策(控制指令), 并通过网关将控制指令发送给相应的执行机构, 控制与其相连的各种物理装置, 实现设施环境的精确控制。

为提高监控系统的测控精度, 往往需要将监控区域划分成若干子区域, 实行分区域控制。因此, 感知网络的体系结构采用分层分簇结构, 如图 2 所示。每个监测子区域形成一个簇, 每个簇由一个簇首、若干传感器节点和若干执行机构组成。簇首是一种特殊的传感器节点, 它通常比传感器节点具有

更强的计算与存储能力；传感器节点周期性地采集监测子区域内的信息并发送给簇首；簇首对本簇内传感器节点采集的数据(称为簇内数据)进行融合后，将簇数据发送给网关；簇首接收来自网关的各种控制指令，并转发给相应的执行机构；执行机构接收到控制指令后，驱动与其相连的物理装置，如加热器、喷头阀门开关等。传感器节点采用单跳/多跳方式向簇首发送传感数据；簇首也通过单跳/多跳方式向传感器节点和执行机构发送相关指令。

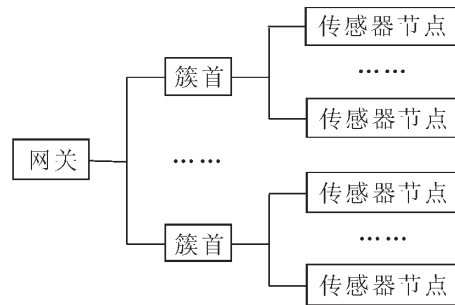


图2 感知网络的体系结构

Figure 2 Architecture of sensor networks

2 基于无线传感器网络的设施农业环境监控系统的进展情况

无线传感器网络在设施农业领域的应用研究始于21世纪初叶。2002年，英特尔公司率先在俄勒冈州建立了世界上第一个无线葡萄园^[14]。传感器节点被分布在葡萄园的每个角落，1 min检测1次土壤温度、湿度或该区域有害物的数量，以确保葡萄可以健康生长。研究人员发现，葡萄园气候的细微变化可极大地影响葡萄酒的质量。通过长年的数据记录以及相关分析，便能精确的掌握葡萄酒的质地与葡萄生长过程中的日照、温度、湿度的确切关系。该方案所使用的节点为美国Crossbow公司的Mote系列节点MICA2和MTS300CA。

此后，国内外众多研究人员开展相关研究，并取得一些成果，典型案例包括：Digital Sun公司开发的自动洒水系统使用无线传感器感应土壤的水分，并在必要时与接收器通信，控制灌溉系统的阀门打开或关闭，从而达到自动、节水灌溉的目的^[15]。在该方案中，为了维护系统运作的流畅，资料收集器会发出信号自动检测洒水线路是否中断，或检测是否有洒水喷头堵塞等情形，并在适当的时候发出警告声，以便通知相关管理者进行适当的维修。Butler等^[16]应用无线传感器网络实现了一个电子篱笆，其传感器节点由个人数字信息处理(personal digital assistant, PDA)模块、全球卫星定位系统(global positioning system, GPS)模块、无线保真(wireless fidelity, WiFi)模块、扬声器和一些连接电缆等组成，被设计成项圈形状，可以佩戴在牲畜脖子上。牧群中传感器节点构成多跳ad hoc网络，将牲畜运动信息实时转发给基站(膝上型电脑)。基站接收到牲畜的运动信息后，调用虚拟篱笆算法动态修订电子篱笆的边界，并将电子篱笆的坐标实时传送给传感器节点。当佩戴传感器节点的牲畜试图跨越电子篱笆时，扬声器发出警报来控制该牲畜的行为。该系统可以实现无人放牧，节约饲养场安装和移动物理篱笆所产生的开销，提高饲养场的使用率。Riem-Vis^[17]设计的商用Securifood系统，用于实现新鲜食品低温运输系统的温度监控。该系统主要由传感器节点、中继设备、访问盒和数据仓库组成。传感器节点传输产品信息和收集温度数据。中继设备收集并存储来自传感器节点的温度数据。众多中继设备构成多跳ad hoc网络。访问盒是一个嵌入式Linux装置，它充当由中继设备构成的网络与Internet之间的网关。每个生产地部署一个访问盒。Internet主机上的数据仓库担当中央服务器，收集、存储并管理来自各访问盒的数据。用户通过Internet可以访问该数据仓库。Wark等^[18]开展了无线传感器网络在家畜饲养业中的应用研究，其目的是应用适当的激励来防止两头牛之间的战斗。为此，作者设计并实现了基于状态机机制的动物状态估计算法，执行机构根据某动物相对于其他动物的状态来执行相关任务。系统采用了移动式传感器节点和执行机构。López Riquelme等^[13]在木尔西亚(Murcia)半干旱地区的一个生态园艺企业中设计并部署了一个试验性无线传感器网络系统。该系统使用了4类节点，即土壤传感器节点、环境传感器节点、水传感器节点和网关。土壤传感器节点能够测量各种土壤特性，例如温度、容积含水率和盐度等；环境传感器节点能够测量环境温度和湿度；水传感器节点部署在池塘边，用于测量灌溉用水的水体盐度和水体温度，以监控灌溉用水的品质。此外，系统还包括一个实时监控应用软件，运行在农场中央办公室的上位机上。

在国家发展和改革委员会的支持下，中国科学技术大学、中国科学院计算技术研究所和国家水利

部淮河水资源保护局合作设计了无线传感网络精准农业监测系统^[14]。该系统在位于蚌埠市的安徽省农业科技示范园区获得初步应用。20 多个节点被均匀地布置在面积大约为 1 200 m² 的花卉大棚内。节点类型包括土壤温度传感器、土壤湿度传感器和光照传感器等。当系统运行时, 每个传感器节点将附近的环境信息和自身的状态信息经过自组织多跳路由传递给基站, 然后通过本地服务器上的数据获取程序将数据传输到远程服务器上。

浙江农林大学、浙江工业大学、上海淮智信息技术有限公司合作设计了基于无线传感器网络的设施农业环境自动监控系统, 即 WSN-FAEAM 系统^[6-8, 14]。它主要由传感器节点、执行机构、网关和上位机管理软件组成。传感器节点有 7 类, 即环境温度节点、环境湿度节点、土壤温度节点、土壤湿度节点、土壤电导率节点、光照度节点、二氧化碳浓度节点等。传感器节点和执行机构符合 IEEE Std 1451.0TM-2007 和 IEEE Std 1451.5TM-2007 标准, 具有即插即用、热插拔和自动校正功能; 网关集成了通用分组无线服务(general packet radio service, GPRS), 无线保真(wireless fidelity, WiFi), 全球通(global system for mobile, GSM), 射频识别(radio frequency identification, RFID)等扩展模块, 集成了以太网接口、串行接口等, 集成了 IEEE 802.15.4/ZigBee 协议栈、精简传输控制协议/互联网络协议(TCP/IP)栈和虚拟互联网络协议(IP)桥, 实现了无线传感器网络与主干网(全球通、Internet 和卫星网络等)之间的透明互联; 上位机管理软件实现了传感数据的数据融合机制, 所有人机接口采用友好的图形化界面设计, 能够直观地动态显示无线传感器网络的拓扑结构并实时监测 WSN-FAEAM 系统的运行状态, 能够直观地对各种传感数据和系统数据进行有效组织和管理。该系统可以应用于大田、温室、苗圃等区域, 实现设施农业环境的远程、实时、自动监控。

总体上看, 上述案例或成果具有里程碑的意义, 它们为无线传感器网络在设施农业领域的应用做出了前瞻性和探索性研究, 并为后续开展相关研究积累了丰厚的技术储备和宝贵经验。在这些典型案例的示范作用下, 越来越多的研究人员加入到相关研究行列, 使得无线传感器网络在设施农业领域的应用成果日益丰富起来。表 1 列举了近年来公开报道的部分应用研究成果。

3 存在的主要问题及未来努力方向

3.1 感知网络的功能性问题及努力方向

目前, 各类基于无线传感器网络的设施农业环境监控系统, 其传感器种类有限, 主要集中在空气温度节点、空气湿度节点、土壤温度节点、土壤湿度节点、土壤电导率节点、光照度节点、二氧化碳浓度节点、水体温度节点、水体电导率节点等, 通过这些传感器节点, 感知网络只能感知生物生长的部分环境信息, 不能感知生物生长所需的全部环境信息, 难以进一步提高监控系统的精度。此外, 现有基于无线传感器网络的设施农业环境监控系统在数据融合、能量管理及后台管理软件等方面, 亦存在严重不足, 直接影响了感知网络的相关性能。

今后的努力方向是: 随着嵌入式技术、微电子技术和传感器技术等不断发展, 研制新型传感器节点, 丰富传感器节点的种类, 实现更多类型环境信息的自动测控; 研制相关传感器节点, 实现对生物生理指标(如作物的细胞液浓度、作物的叶片含水量、作物的叶温等)的实时、远程、自动测控, 进而直接诊断作物的水分匮乏情况。同时, 建立安全高效的无线传感器网络数据融合机制, 建立安全高效的能量管理机制, 开发安全高效的后台管理软件, 等等。这样, 可以有效提高设施农业环境监控系统的自动化、智能化程度, 同时有效提高设施农业环境测控系统的精度。

3.2 传感器的即插即用问题及努力方向

随着设施农业环境监控系统自动化、智能化程度的不断提高, 所需传感器节点的种类将会越来越多。传感器节点通常集成有传感器、处理器、无线通信、电源等主要功能模块。由于目前总线的种类繁多, 每种总线的应用范围各不相同, 彼此之间的兼容性与互操作性极差, 导致各个传感器制造厂商往往只生产满足特定总线接口的传感器, 由此带来严重的传感器与通信网络之间的兼容性和互操作性问题, 无法实现传感器的即插即用和热插拔功能。对于执行机构, 也面临同样的问题。目前, 这个问题已经成为阻碍基于无线传感器网络的设施农业环境监控系统应用推广的主要因素。

表1 基于无线传感器网络的设施农业环境监控系统的一些案例

Table 1 Some cases of WSN-based monitoring system for facility agriculture environment

应用系统名称	应用系统描述
基于紫蜂 (ZigBee) 技术的粮库监测系统 ^[19]	层次型网络拓扑结构; 设计了空气温度/湿度节点; 采用无线或 RS-485 和中心节点通信。
基于 ZigBee 网络的温室环境远程监控系统 ^[20]	星型网络拓扑结构; 设计了空气温度/湿度节点、土壤温度/湿度节点、二氧化碳浓度节点、太阳总辐射节点、作物光合有效辐射节点、网关等; 通过网关, 实现数据远程传输至指定数据库服务器。
基于无线传感器网络的农田土壤温湿度监测系统 ^[21]	设计了土壤温度/湿度节点、网关等; 远程数据中心管理软件采用数据库管理模式, 通过美国环境系统研究所 (ESRI) 嵌入式地理信息系统 (GIS) 组件库 ArcEngine 进行传感数据的实时变化和空间变异分析。
基于无线传感器网络的农田信息采集节点 ^[22]	基于 ZigBee 无线传感器网络技术; 设计了土壤水分节点、网关等。
基于无线传感器网络的微灌监控系统 ^[23]	基于 ZigBee 无线传感器网络技术; 系统由嵌入式测控终端、中央监控计算机和终端监控软件及其操控平台等组成; 设计了土壤温度/湿度节点、网关等。
基于无线传感器网络的温室测控系统 ^[24]	设计了空气温度/湿度节点、光照度节点和网关; 软件基于模块化思想设计, 实现了数据的获取、处理和控制输出等功能。
基于无线传感器网络的温室监测系统 ^[25]	设计了空气温度/湿度节点、光照度节点和网关; 为系统定制了路由协议; 利用谷歌地图 (Google map) 提供的应用程序接口 (API), 结合 Ajax 技术和 SQL Server 数据库开发了远程监测平台; 在北京小汤山现代农业科技示范园进行了初步试验。
温室无线测控网络信息采集系统 ^[26]	设计了空气温度/湿度节点、光照度节点、二氧化碳浓度节点和网关; 结合温室智能控制系统和农业信息专家系统, 实现了温室信息采集的自动部署、自组织传输和温室环境的精细化控制; 系统通过集成通用分组无线服务 (GPRS) 和以太网接口, 实现了温室信息的远程访问。
基于无线传感网络与模糊控制的精细灌溉系统 ^[27]	基于 ZigBee 无线传感网络与模糊控制方法; 设计了空气温度/湿度节点、太阳总辐射节点、风速节点、执行结构等; 该系统在嘉兴南湖区滴灌葡萄园进行了初步试验。
无线传感器网络农业远程监控系统 ^[28]	设计了空气温度/湿度节点、光照度节点等; 该系统在北京远郊的农业基地进行了初步试验。
基于 ZigBee 技术的淡水养殖溶氧浓度监控系统 ^[29]	基于 ZigBee 无线传感器网络技术; 系统由传感器及信号处理电路、加氧控制电路、控制与数据收发电路、显示电路组成; 设计了溶氧浓度节点、水体温度节点、网关 (主机收发节点)、控制器、执行机构 (加氧控制无线节点) 等。

今后的努力方向是: 遵循 IEEE Std 1451.0TM-2007 和 IEEE Std 1451.5TM-2007 标准, 设计传感器节点和执行机构。文献[14]对此已经进行了有益尝试, 但是所取得的结果还是比较初步的, 在稳定性、可靠性、经济性等方面目前还难以完全满足设施农业生产的应用需求。需要对文献[14]提出的基于 IEEE 1451 标准的传感器节点和执行机构设计方案进行优化和改进。

3.3 无线传感器网络与广域网的互连问题及努力方向

这个问题的基本涵义是: ①在设施农业应用中, 用户往往需要通过 Internet 等来访问监控系统的各种传感数据和系统数据, 并对部署在监测区域的特定节点进行操作, 因此需要实现无线传感器网络与主干网之间的透明互连。②独立组网是无线传感器网络初期的一种组网方式, 出于对传输可靠性、传输时延等因素的考虑, 单一无线传感器网络的规模不可能太大, 一般仅限于局域网的层次。为了实现无线传感器网络的大规模组网以及不同感知子网络之间的互联互通, 必需实现无线传感器网络与广域网之间的透明互连。上述任务理所当然由网关 (或称为汇聚节点) 来完成。现有的网关设计与实现方案虽然在一定程度上实现了上述功能, 但是还远远不能满足将来设施农业的应用需求, 特别地, 现有网关难以满足无线传感器网络的大规模组网的应用需求。

今后的努力方向是: 结合应用需求和相关技术的发展趋势, 研制监控系统的网关, 实现无线传感器网络与广域网之间的透明互连。目前, 实现网关的主流技术大体上可以分为 4 类, 即协议转换方式、协议承载方式、虚拟互连网络协议 (IP) 桥方式以及全 IP 方式^[14,30-33]。文献[14]对 4 类网关实现技术进行了分析比较, 认为只有虚拟 IP 桥方式是切实可行的。但是文献[14]提出的基于虚拟 IP 桥的网关设计方案是非常初步的, 难以满足未来设施农业生产实践的需求。需要对文献[14]提出的网关设计方案进行优化和改进。特别地, 鉴于 TCP/IP 协议的广泛成功应用已经使其成为当前有线网络事实上的协议标准, 并且其应用范围正逐步向无线领域拓展, 因此, 未来可以重点关注无线传感器网络与互连网络协议网络的互连与融合问题, 尤其是无线传感器网络与 IPv6 网络的互连与融合问题。

3.4 上位机软件的功能性问题及努力方向

现有各类上位机软件虽然能够满足对传感数据和系统数据进行组织和管理的基本要求，但是功能比较单一，数据处理、数据分析与数据挖掘的能力弱，基本上没有实现数据校正、数据融合和决策分析等功能，难以满足设施农业生产的实际需求。

今后的努力方向是：在现有工作基础上，进一步优化上位机软件设计方案，充分利用先进的数据库技术、智能控制技术、数据融合技术、校正补偿技术、软件工程技术、计算机网络技术等，实现上位机软件友好的人机接口，使得上位机软件具有如下基本功能：能够直观地动态显示无线传感器网络的拓扑结构并实时监测基于无线传感器网络的设施农业环境监控系统的运行状态；能够直观地对各种传感数据和系统数据进行有效组织和管理；能够便捷地实现感知子网络之间传感信息的高度共享，能够便捷地实现传感信息的广域网共享。此外，上位机软件必须实现高度的智能，使之能够精确地运用各种专家知识进行决策分析并计算控制指令，实现设施环境的精确控制，满足工厂化设施农业的应用需求。

3.5 传感器节点的功耗问题及努力方向

目前，某些传感器，例如二氧化碳传感器、声发射传感器、茎流传感器、茎秆直径变化量传感器等，其工作功率较大，使得对应的传感器节点不太适合使用 5 号电池或锂电池提供电能，需使用太阳能电池或市电为之提供电能，这将直接导致相应传感器节点的体积过大和成本过高，从而限制无线传感器网络在设施农业领域的应用。

今后的努力方向是：①促进微电子技术和传感器技术的进步，研制低功耗传感器。②促进储能技术的进步，研制容量大、体积小、能量储存和转换效率高、寿命长的新型储能电池。特别地，研制具有自充电功能的生物电池，具有广阔的应用和产业化前景。③探索无线传感器网络与各种传统远程环境数据采集终端协同工作的模式，实现两者之间的优势互补。

3.6 监控系统的安全性问题及努力方向

迄今为止，所设计的各类基于无线传感器网络的设施农业环境监控系统，都没有涉及系统的安全性问题。换言之，现有各类基于无线传感器网络的设施农业环境监控系统是一个非常不安全的系统，容易遭受各种攻击。在实际应用于生产实践之前，这是必须解决的问题。

今后的努力方向是：针对无线传感器网络具有通信能力、电源能量、计算速度、存储空间受限和传感器节点配置密集、网络拓扑结构灵活多变等特点，为基于无线传感器网络的设施农业环境监控系统设计并部署轻量级安全机制，实现监控系统的安全通信。这是未来无线传感器网络技术的一个研究前沿和研究热点问题。

4 结束语

在进行深入研究的基础上，对基于无线传感器网络的设施农业环境监控系统研究进展进行了评述。首先，对各种形式各异的基于无线传感器网络的设施农业环境监控系统的体系结构进行了分析，在此基础上，对其进行高度抽象，提出了基于无线传感器网络的设施农业环境监控系统的通用体系结构，它由感知网络、网关、主干网和用户网络等组成。感知网络由部署在监控区域的传感器节点和执行机构以无线 ad hoc 方式构成。根据应用需要，感知网络可能采用分层分簇的体系结构。其次，对现有相关应用研究成果中的典型案例进行了详细的评述。最后，指出了现有基于无线传感器网络的设施农业环境监控系统的不足，同时提出了具体的解决方案，指出了未来的努力方向。论文对开展无线传感器网络在设施农业领域的应用研究具有指导意义。

参考文献：

[1] 徐希春，初江，高晓惠. 设施农业的发展分析[J]. 农机化研究，2008 (8)：237- 240.

XU Xichun, CHU Jiang, GAO Xiaohui. The development analysis of agricultural facilities [J]. *J Agric Mech Res*, 2008 (8) : 237 - 240.

- [2] 梁竹君, 武丽. 环境监控技术在设施农业中的应用[J]. 安徽农业科学, 2009, **37** (16): 7672 - 7673, 7753.
LIANG Zhujun, WU Li. Application of the environmental monitoring technology in the protected agriculture [J]. *J Anhui Agric Sci*, 2009, **37** (16): 7672 - 7673, 7753.
- [3] 赵金才. 测控装置在设施农业中的应用分析[J]. 安徽农业科学, 2009, **37** (11): 5127 - 5128, 5206.
ZHAO Jincai. Application analysis of measurement device in facility agriculture [J]. *J Anhui Agric Sci*, 2009, **37** (11): 5127 - 5128, 5206.
- [4] 高峰, 俞立, 卢尚琼, 等. 国外设施农业的现状与发展趋势[J]. 浙江林学院学报, 2009, **26** (2): 279 - 285.
GAO Feng, YU Li, LU Shangqiong, et al. Status quo and development trend of facility agriculture in foreign countries [J]. *J Zhejiang For Coll*, 2009, **26** (2): 279 - 285.
- [5] 高峰, 俞立, 张文安, 等. 现代通信技术在设施农业中的应用综述[J]. 浙江林学院学报, 2009, **26** (5): 742 - 749.
GAO Feng, YU Li, ZHANG Wenan, et al. Review of modern communication technology and its application to facility agriculture [J]. *J Zhejiang For Coll*, 2009, **26** (5): 742 - 749.
- [6] 高峰, 俞立, 张文安, 等. 基于作物水分胁迫声发射技术的无线传感器网络精量灌溉系统的初步研究[J]. 农业工程学报, 2008, **24** (1): 60 - 63.
GAO Feng, YU Li, ZHANG Wenan, et al. Preliminary study on precision irrigation system based on wireless sensor networks of acoustic emission technique for crop water stress [J]. *Trans CSAE*, 2008, **24** (1): 60 - 63.
- [7] 高峰, 俞立, 张文安, 等. 基于茎直径变化的无线传感器网络作物精量灌溉系统 [J]. 农业工程学报, 2008, **24** (11): 7 - 12.
GAO Feng, YU Li, ZHANG Wenan, et al. Preliminary study on crop precision irrigation system based on wireless sensor networks for stem diameter microvariation [J]. *Trans CSAE*, 2008, **24** (11): 7 - 12.
- [8] 高峰, 俞立, 张文安, 等. 基于无线传感器网络的作物水分状况监测系统研究与设计[J]. 农业工程学报, 2009, **25** (2): 107 - 112.
GAO Feng, YU Li, ZHANG Wenan, et al. Research and design of crop water status monitoring system based on wireless sensor networks [J]. *Trans CSAE*, 2009, **25** (2): 107 - 112.
- [9] BARONTI P, PILLAI P, CHOOK V W C, et al. Wireless sensor networks: a survey on the state of the art and the 802.15.4 and ZigBee standards [J]. *Comput Commun*, 2007, **30** (7): 1655 - 1695.
- [10] GARCÍA-HERNÁNDEZ C F, IBARGÜENGOYTIA-GONZÁLEZ P H, GARCÍA-HERNÁNDEZ J, et al. Wireless sensor networks and applications: a survey [J]. *Int J Comput Sci Network Secur*, 2007, **7** (3): 264 - 273.
- [11] YICK J, MUKHERJEE B, GHOSAL D. Wireless sensor network survey [J]. *Comput Networks*, 2008, **52** (12): 2292 - 2330.
- [12] FLAMMINI A, FERRARI P, MARIOLI D, et al. Wired and wireless sensor networks for industrial applications [J]. *Microelectron J*, 2009, **40** (9): 1322 - 1336.
- [13] LÓPEZ RIQUELME J A, SOTO F, SUARDÍAZ J, et al. Wireless sensor networks for precision horticulture in southern Spain [J]. *Comput Electron Agric*, 2009, **68** (1): 25 - 35.
- [14] RÖMER K, MATTERN F. The Design space of wireless sensor networks [J]. *IEEE Wireless Commun*, 2004, **11** (6): 54 - 61.
- [15] 高峰. 基于无线传感器网络的设施农业环境自动监控系统研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2009.
GAO Feng. *Research on the Automatic Monitoring System Based on Wireless Sensor Networks for Facility Agriculture Environment* [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2009.
- [16] BUTLER Z, CORKE P, PETERSON R, et al. *Networked Cows: Virtual Fences for Controlling Cows* [EB/OL]. [2009-11-15]. http://cmc.cs.dartmouth.edu/cmc/papers/butler_virtualfence2.pdf.
- [17] RIEM-VIS R. *Cold Chain Management Using an Ultra Low Power Wireless Sensor Network* [EB/OL]. [2009-11-15]. http://www2.unine.ch/webdav/site/esplab/shared/documents/conferences/wames2005_rrv_cold_chain.pdf.
- [18] WARK T, CROSSMAN C, HU W, et al. The design and evaluation of a mobile sensor/actuator network for autonomous animal control [M]//IPSN. *Proceedings of the 6th International Conference on Information Processing in Sensor Networks*. Cambridge: ISPN, 2007: 206 - 215.
- [19] 包长春, 李志红, 张立山, 等. 基于 ZigBee 技术的粮库监测系统设计[J]. 农业工程学报, 2009, **25**(9): 197 - 201.
BAO Changchun, LI Zhihong, ZHANG Lishan, et al. Design of monitoring system for grain depot based on ZigBee technology [J]. *Trans CSAE*, 2009, **25** (9): 197 - 201.

- [20] 韩华峰, 杜克明, 孙忠富, 等. 基于 ZigBee 网络的温室环境远程监控系统设计与应用[J]. 农业工程学报, 2009, **25** (7): 158 - 163.
HAN Huafeng, DU Keming, SUN Zhongfu, *et al.* Design and application of ZigBee based telemonitoring system for greenhouse environment data acquisition [J]. *Trans CSAE*, 2009, **25** (7): 158 - 163.
- [21] 刘卉, 汪懋华, 王跃宣, 等. 基于无线传感器网络的农田土壤温湿度监测系统的设计与开发 [J]. 吉林大学学报: 工学版, 2008, **38** (3): 604 - 608.
LIU Hui, WANG Maohua, WANG Yuexuan, *et al.* Development of Farmland soil moisture and temperature monitoring system based on wireless sensor network [J]. *J Jilin Univ Eng Technol Ed*, 2008, **38** (3): 604 - 608.
- [22] 蔡义华, 刘刚, 李莉, 等. 基于无线传感器网络的农田信息采集节点设计与试验[J]. 农业工程学报, 2009, **25** (4): 176 - 178.
CAI Yihua, LIU Gang, LI Li, *et al.* Design and test of nodes for farmland data acquisition based on wireless sensor network [J]. *Trans CSAE*, 2009, **25** (4): 176 - 178.
- [23] 王益祥, 吴林, 段俊丽. 基于无线传感器网络的微灌监控系统研究[J]. 测控技术, 2009, **28** (3): 64 - 67.
WANG Yixiang, WU Lin, DUAN Junli. Monitoring system of micro-irrigation based on wireless sensor network [J]. *Meas & Control Technol*, 2009, **28** (3): 64 - 67.
- [24] 张保华, 李士宁, 滕文星, 等. 基于无线传感器网络的温室测控系统研究设计 [J]. 微电子学与计算机, 2008, **25** (5): 154 - 157.
ZHANG Baohua, LI Shining, TENG Wenxing, *et al.* Development and design of greenhouse testing and control system based on wireless sensor networks [J]. *Microelectron & Comput*, 2008, **25** (5): 154 - 157.
- [25] 李栋. 基于无线传感器网络的温室监测系统的设计与研究[D]. 无锡: 江南大学, 2008.
LI Dong. *Greenhouse Surveillance System based on Wireless Sensor Networks* [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2008.
- [26] 罗海勇, 李锦涛, 赵方, 等. 温室无线测控网络信息采集分系统设计研究[J]. 微电子学与计算机, 2007, **24** (10): 1 - 4, 7.
LUO Haiyong, LI Jintao, ZHAO Fang, *et al.* Research and design of intelligent greenhouse monitoring and controlling system based on wireless sensor network [J]. *Microelectron & Comput*, 2007, **24** (10): 1 - 4, 7.
- [27] 张伟, 何勇, 裘正军, 等. 基于无线传感网络与模糊控制的精细灌溉系统设计[J]. 农业工程学报, 2009, **25** (增刊 2): 7 - 12.
ZHANG Wei, HE Yong, QIU Zhengjun, *et al.* Design of Precision irrigation system based on wireless sensor network and fuzzy control [J]. *Trans CSAE*, 2009, **25** (supp 2): 7 - 12.
- [28] 梁玉芬. 无线传感器网络农业远程监控系统的设计与实现[D]. 北京: 北京交通大学, 2007.
LIANG Yufen. *Design and Implementation of the Agriculture Remote Monitoring System Based on Wireless Sensor Network* [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2007.
- [29] 董方武, 詹重咏, 应玉龙, 等. 无线传感器网络在淡水养殖溶氧浓度自动监控中的应用[J]. 安徽农业科学, 2008, **36** (32): 14345 - 14347.
DONG Fangwu, ZHAN Chongyong, YING Yulong, *et al.* Application of wireless sensor networks in dissolved oxygen concentration of freshwater aquaculture automatic monitoring system [J]. *J Anhui Agric Sci*, 2008, **36** (32): 14345 - 14347.
- [30] SHU Lei, XU Hui, WU Xiaoling, *et al.* VIP bridge: integrating several sensor networks into one virtual sensor network [M]//ICISP. *Internet Surveillance and Protection* 2006. Atlanta: ICISP, 2006: 2.
- [31] SHU Lei, WU Xiaoling, XU Hui, *et al.* Connecting heterogeneous sensor networks with ip based wire/wireless networks [M]// SEUS-WCCIA. *Proceedings of the Fourth IEEE Workshop on Software Technologies for Future Embedded and Ubiquitous Systems, and the Second International Workshop on Collaborative Computing, Integration and Assurance*. Gyeongju: SEUS-WCCIA, 2006: 127 - 132.
- [32] HAN Guangjie, MA Maode. Connecting sensor networks with IP using a configurable tiny TCP/IP protocol stack [M]//ICISS. *6th International Conference on Information, Communications & Signal Processing*. Singapore: ICISS, 2007: 1 - 5.
- [33] SHU Lei, CHO Jinsung, LEE Sungyoung, *et al.* VIP bridge: leading ubiquitous sensor networks to the next generation [J]. *J Internet Technol*, 2007, **8** (3): 1 - 13.