

## 无线传感器网络技术在精细农业中的应用进展

李震<sup>1,2,3,4</sup>, 洪添胜<sup>1,2,3\*</sup>, Ning WANG<sup>4</sup>

(1.南方农业机械与装备关键技术教育部重点实验室, 广东 广州 510642; 2.华南农业大学 工程学院, 广东 广州 510642; 3.国家柑橘产业技术体系机械研究室, 广东 广州 510642; 4.俄克拉荷马州立大学 农业与生物系统工程系, 111 Ag Hall, Stillwater, OK, 74078, 美国)

**摘要:**综述无线传感器网络技术在节点构成、网络拓扑、通信协议等方面的特点, 重点介绍无线传感器网络技术在精细农业中的典型应用, 认为无线传感器网络技术应用于精细农业, 需解决信号传输与衰减方式建模、多通信网融合及降低传感器成本等关键问题。提出将无线传感器网络技术与农艺技术、农业机械化及自动化技术等相结合, 有助于优化农业决策支持系统, 发现和解决农业机具的潜在问题, 促进农业管理的规范化, 降低能耗, 节省人力资源培训成本等。

**关键词:**无线传感器网络; 精细农业; 传感器节点; 嵌入式系统

中图分类号: S126 文献标志码: A 文章编号: 1007-1032(2011)05-0576-05

## Review on wireless sensor network technology applications in precision agriculture

LI Zhen<sup>1,2,3,4</sup>, HONG Tian-sheng<sup>1,2,3\*</sup>, Ning WANG<sup>4</sup>

(1. Key Laboratory of Key Technology for South Agricultural Machinery and Equipment, Ministry of Education, Guangzhou 510642, China; 2. College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 3. National Citrus Industry Technology Research System Machinery Laboratory, Guangzhou 510642, China; 4. Department of Biosystems and Agricultural Engineering, Oklahoma State University, 111 Ag Hall, Stillwater, OK, 74078, USA)

**Abstract:** WSN (wireless sensor network) characteristics including node structure, network topology and communication protocol were fully reviewed while typical precision agriculture WSN applications were specially introduced. Key issues of signal propagation and attenuation modeling, fusion of multiple communication networks as well as lowering sensor cost have to be solved considering precision agricultural applications. It is addressed that the combination of WSN technology with other agricultural technologies such as agronomy, agricultural mechanization and automation will be important and supportive to optimize decision support system in precision agriculture development, identify potential problem inside agricultural equipments, promote agricultural management standardization, and minimize energy use and human resource training cost.

**Key words:** wireless sensor network; precision agriculture; sensor nodes; embedded system

大范围、实时、连续高效地获取农情信息是精细农业发展中需要解决的重要问题。传统的数据获取在很大程度上依赖于密集的农业机械作业和人力劳动, 成本高、效率低下, 且所获数据在覆盖范围和实时性等方面无法满足精细农业的需求。无线

传感器网络技术(wireless sensor network, WSN)集传感器、嵌入式计算机、现代网络及无线通信等新技术于一体, 通过各种集成化微型传感器协作, 实时监测、感知和采集监测对象的信息, 通过嵌入式系统对信息进行处理, 并以无线通信的方式进行传

收稿日期: 2011-04-30

基金项目: 国家公益性行业(农业)科研专项(200903023); 国家现代农业产业技术体系建设专项(农科教发[2011]3号); 华南农业大学博士启动基金项目(4500-K10056)

作者简介: 李震(1981—), 男, 广东广州人, 博士, 讲师, 主要从事电子信息技术应用研究, lizhen@scau.edu.cn; \*通信作者, tshong@scau.edu.cn

送,可以节约网络搭建成本并克服有线网络的缺点,被列为改变世界的 10 大新技术之一<sup>[1]</sup>。

在精细农业中,WSN 系统需适应恶劣且复杂多变的工作环境,因而对系统稳定性、鲁棒性、安全性、功耗和成本等要求也较为苛刻。笔者在简介无线传感器网络技术的基础上,重点介绍该技术在精细农业中的应用现状,提出和分析该技术在精细农业应用中需解决的重点问题及发展趋势。

## 1 无线传感器网络技术

典型的无线传感器网络结构包括传感器节点、汇聚节点和管理节点<sup>[2-3]</sup>。传感器节点又称“智能微尘”,具备有限的数据处理能力;汇聚节点具备较强的数据处理、存储和通信能力,负责数据的收集、汇总及作为网关连接本地传感器网络和外部互联网(Internet);管理节点通过 Internet 实现对传感器网络的数据监测和系统配置。无线传感器网络监测区域广、体积小、成本低、安装灵活、维护简便、可扩展性强,具备自组织、自适应、以数据为中心、面向具体应用等优势<sup>[4]</sup>,已在销售管理、交通管理、建筑物监测、医疗信息采集等领域得到广泛应用<sup>[5-9]</sup>。

无线传感器网络系统通常由网络硬件、操作系统和通讯协议等 3 部分组成。①网络硬件:包括分布在监测区域内的传感器节点、汇聚节点和网关等<sup>[10]</sup>。现有的传感器节点硬件平台可分为两类:商业化的通用平台和为特定需要而开发的特殊配置平台。商业化的通用平台通常在出厂时已安装了常用传感器,并提供连接其他传感器和外围设备的标准接口。该平台又可进一步划分为集数据采集、存储和无线通信为一体的节点型和数据采集设备搭配无线通信设备的混合型。②操作系统:主要负责协调网络平台上各元件工作,最基本的任务包括数据采集、存储和传输等。大多数 WSN 设备采用了 TinyOS 操作系统及基于其之上的 TinyDB 数据管理系统<sup>[11-12]</sup>,其他专为 WSN 平台设计的操作系统包括 SenOS、MANTIS、Nano-Qplus、BtNuts 等面向有限资源的操作系统<sup>[13-15]</sup>,Linux 和 Windows CE 等应用于 PDA 上的嵌入式操作系统,以及应用于 Stargate、Imote 等系统网关的操作系统。③通讯协议:ZigBee 协议是 WSN 中的零星节点进行短距离无线通信时应用最广泛的通信协议<sup>[16]</sup>,其最大传输距离可达 70 m,可靠,低成本,高效,主要用于

小规模控制网络;其他 WSN 协议和标准包括 WiFi 协议(IEEE 802.11b)<sup>[17]</sup>、蓝牙标准(IEEE 802.15.1)<sup>[18]</sup>、射频识别协议(RFID)<sup>[19]</sup>、红外协议(IrDA)以及声波协议等。

## 2 WSN 在精细农业中的应用进展

### 2.1 在精细灌溉中的应用

大量的传感器节点可构成监控网络,通过土壤墒情传感器采集信息,配合网络多跳路由、自组网、信息互递等特点,连续、实时地向灌溉控制设备发布灌溉控制信息,同时将田间监测数据通过网关节点发送至互联网,实现精细灌溉的自动化、智能化及远程控制<sup>[20]</sup>。基于 WSN 的农情监测和自动灌溉控制系统在果园、温室、风景区和育苗场得到广泛应用<sup>[21-24]</sup>。

闻珍霞等<sup>[25]</sup>设计制作了一种精准滴灌自动控制系统,该系统由土壤、环境信息无线传感网络检测装置和滴灌自动控制系统组成,快速检测土壤的主要水分、温度及养分信息和环境的温度、相对湿度、光照强度后,通过信息获取和动态分析处理平台,处理并计算出相应的灌溉数据,控制滴灌设施和控制阀的工作状态,按作物生长需求进行定量、定点精准灌水、施肥,实现节水节肥、增产增效和保护农业生态环境等目标。

Kim 等<sup>[26]</sup>研发了一种闭环控制自动灌溉系统,该系统在田间设有若干个土壤湿度传感器节点,1 个灌溉控制节点,1 个气候监测节点和 1 个基站。土壤湿度传感器节点和气候监测节点协作提供各种田间参数,基站负责控制灌溉并通过灌溉控制节点来调控线性洒水装置。不同节点之间的无线通信基于通过蓝牙协议实现,无线信号传输距离可达 700 m。

冯友兵等<sup>[27]</sup>从灌溉需求和固定管道式喷灌系统的结构特点出发,设计出两层无线传感器网络体系结构,通过分析传感器传感半径和喷头射程之间的关系,获得了完全感知覆盖田块所需最少传感器数的表达式及部署方法,结合网络结构和节点分工,给出了数据的传输方式,并通过分层故障诊断的方法确保数据传输的可靠性。

### 2.2 在温室和果园管理中的应用

Liu 等<sup>[28]</sup>开发了用于监测温室内温度、光照和

土壤湿度等信息的 WSN 系统。分布在温室不同位置的节点负责采集数据,监测数据通过基于全球移动通信系统(GSM)的短消息服务传回到监控中心。监测及测试结果表明,在葡萄园中心位置的温度较靠窗位置稳定;天线位置对无线传输有重要影响。

Beckwith 等<sup>[29]</sup>利用一个配置了 65 个传感器节点的大型高密度 WSN 系统,监控面积约为 0.81 hm<sup>2</sup> 的葡萄园的温度变化。传感器节点的位置根据研究的需要(不是单纯的节点中心视角)进行布置。每个数据包被发送 5 次,并限制在 8 个链路上传送以获得可靠通信。为了更加详细地了解葡萄园内温度的变化规律,传感器节点每 5 min 发送 1 次温度监测数据,其他监测信息包括电池使用情况和信息包丢失情况等,此系统的平均数据接收率达到 77%。

LI 等<sup>[30]</sup>提出了一个建立在无线传感器网络基础上的嵌入式温室监控系统。该系统以采用基于 ARM9 内核的 S3C2410 微处理器的簇首节点作为控制核心,具有较强的数据处理能力;传感器节点采用低功耗的 MSP430F149 微处理器,降低了节点的工作能耗。通过采用睡眠和唤醒模式,传感器节点的平均寿命可提升 44%。

郭文川等<sup>[31]</sup>设计了基于无线传感器网络的温室环境信息监测系统。该系统以 CC2430 为核心,开发无线传感器节点,完成温室环境因子实时监测;采用 ZigBee 技术实现无线传感器网络自组网和监测数据自动汇聚;基于 ARM9 微处理器和 WinCE5.0 构建网关节点,采用嵌入式数据库管理模式实现了传感器节点管理、环境数据管理和预警等功能。该系统具有功耗低、组网灵活、可扩展性强、人机界面友好等优点,能较好地满足温室环境监测的应用需求。

### 2.3 在牧群和家禽家畜养殖经营中的应用

大范围、实时、有效地监测动物个体或种群状况,有助于在早期发现动物个体或群体的潜在健康问题,更好地了解动物的行为表现,对牧群或畜禽养殖经营至关重要。大规模集约化养殖采用人工监测方法,工作量大,且容易误判。实现牧群和家禽家畜饲养的自动化、信息化可基于 GPS、RFID 或 WSN 平台,但基于 GPS 和 RFID 的平台极易受到系统稳定性、能源消耗、成本和通信范围的影响<sup>[32-33]</sup>。而基于 WSN 的平台则受以上因素影响较小,更加适用于动物个体或种群状况监测<sup>[34]</sup>。

Lowe 等<sup>[35]</sup>开发了可记录包括心电图和脑电图在内的动物生理波形数据的 WSN 系统。系统采样率为 1 200 次/s,数据存储量为两路信号各存储长达 7 min 的采样数据或一路信号 14 min 的采样数据,电源在不用替换的条件下可持续工作 20 h。

Kwong 等<sup>[36-37]</sup>设计了一个测量奶牛在饮水槽周围所耗时间的 WSN 系统。传感节点作为项圈戴在奶牛颈部,项圈的接收器能够按设定的时间间隔记录 GPS 数据,并且只要进入基站点的通讯范围,在任何时候都能装载数据。为了提高无线电的传播效果并使项圈的数据更加容易被接收,在奶牛身体两侧分别安装天线。该技术还被应用于监测牛群的疾病和跛脚等情况。

尹令等<sup>[38]</sup>设计了一套基于无线传感器网络的奶牛行为特征监测系统,以自动识别奶牛是否发情或生病。该系统在奶牛颈部安装无线传感器节点获取奶牛的体温、呼吸频率和运动加速度等参数,采用 K-均值聚类算法对提取的各种参数进行行为特征多级分类识别,以此建立的动物行为监测系统能准确区分奶牛静止、慢走、爬跨等行为特征,长时间监测奶牛的健康状态。

在牧群管理上,澳大利亚研究人员应用传感器网络建立智能农场,在牛脖子上佩戴 GPS 和无线传感器节点的项圈来记录相关环境和牛的行为特征<sup>[39-40]</sup>。Nadimi 等<sup>[41]</sup>提出采用无线传感器网络节点测量牛颈部的旋转角度和运动速度,运用分类树来分类牛的行为。Wark 等<sup>[42]</sup>讨论应用无线传感器网络构建虚拟栅栏监控牛的行为,以保护环境敏感地区。

### 3 WSN 在精细农业应用中需解决的问题

目前在精细农业中应用 WSN,仍有许多基础性问题 and 关键技术需要解决,如节点的能量有限性、计算存储能力、传输层和数据通信质量、网络覆盖范围和结构以及网络协议的统一标准等。已有的 WSN 应用仍以测量为主,鲜有将测量与控制结合,形成闭环控制系统。未来精细农业中应用 WSN,在解决或优化能耗、路由机制、通信质量、网络结构等共性问题的基础上,还需针对精细农业应用环境、监测和控制目标的特点,重点解决以下关键问题。

1) 信号传输与衰减方式建模。已有的研究<sup>[43-46]</sup>结果表明,无线电波在田间和果园等精细农业应用作业环境传播时的路径损耗是可预测的,未能考虑

植被、地形地貌、栏舍结构等因素的综合作用；因此，研究无线传感器网络射频信号的路径损耗与各影响因素之间的关系，建立路径损耗预测模型，对 WSN 节点的快速、合理部署及保障精细农业应用中网络的稳定通信具有重要的指导意义。

2) 多种通信网融合。精细农业中应用 WSN，受节点通信距离和能耗等因素的限制，本地网络与远程监控平台间往往无法直接通信。为实现随时、随地监控精细农业环境中作物和禽畜的生长发育状况，基于 WSN 的精细农业自动监控系统必须实现有效的多网融合，即整合无线传感网、GSM 通信网络、Internet 和卫星通信网等。目前，常用的 WSN 与主干网间互联的方式仍是通过 GPRS 服务，在数据传输率、信息获取成本等方面尚难达到大规模应用的要求。因此，实现有效的多网融合是精细农业 WSN 亟待解决的问题。

3) 降低传感器成本。为实现对环境的有效监测，精细农业 WSN 往往需要布置数量庞大的微型传感器，低成本传感器的研发也成为个紧迫的课题。

#### 参考文献:

- [1] Norris A, Saafi M, Romine P. Temperature and moisture monitoring in concrete structures using embedded nanotechnology/microelectromechanical systems (MEMS) sensors[J]. *Constructions Building and Materials*, 2008, 22: 111-120.
- [2] Li D, Wong K D, Hu Y H, et al. Detection, classification and tracking of targets[J]. *IEEE Signal Processing Mag*, 2002, 19: 17-29.
- [3] Boegen H, Schulz K, Verreck H. Towards a network of observatories in terrestrial environmental research[J]. *Advances in Geosciences*, 2006, 9: 109-114.
- [4] 江海峰, 甄阳清, 傅毅. 矿井无线传感器网络的网关设计[J]. *计算机工程*, 2009, 35(1): 112-114.
- [5] Li Z, Wang N, Franzen A, et al. Development of a wireless sensor network for field soil moisture monitoring[C]//ASABE. *Proceedings of the 2008 ASABE Annual International Meeting*. St Joseph MI USA: ASABE, 2008: 083835.
- [6] Li Z, Wang N, Franzen A, et al. In-field soil property monitoring using hybrid sensor network[C]//ASABE. *Proceedings of the 2009 ASABE Annual International Meeting*. St Joseph MI USA: ASABE, 2009: 096191.
- [7] Milenkovic A, Otto C, Jovanov E. Wireless sensor networks for personal health monitoring: Issues and an implementation[J]. *Computer Communications*, 2006, 29: 2521-2533.
- [8] Wang Y, Lynch J, Law K. A wireless structural health monitoring system with multithreaded sensing devices: Design and validation[J]. *Structure & Infrastructure Engineering: Maintenance, Management, Life-Cycle*, 2007, 3(2): 103-120.
- [9] Jackson T, Mansfield K, Saafi M, et al. Measuring soil temperature and moisture using wireless MEMS sensors[J]. *Journal of Measurement*, 2007, 41(4): 381-390.
- [10] Gay D, Levis P R, Behren V, et al. The nesC language: A holistic approach to networked embedded system [DB/OL]. <http://nesc.sourceforge.net/papers/nesc-pldi-2003>.
- [11] TinyOS development team. TinyOS[EB/OL]. <http://en.wikipedia.org/wiki/TinyOS-2009>.
- [12] Mohamed A, Sharaf J B, Alexandros L, et al. TiNA: A scheme for temporal coherency-aware in-network aggregation[C]//ACM. *Proceedings of the 3rd ACM International Workshop on Data Engineering for Wireless and Mobile Access*. New York: ACM, 2003: 69-76.
- [13] Park S, Kim J W, Shin K Y, et al. A nano operating system for wireless sensor networks[C]//IEEE. *Proceeding of the 8th International Conference Advanced Communication Technology Los Alamitos USA: IEEE Publication*, 2006: 345-348.
- [14] Bhatti S, Carlson J, Dai H, et al. Mantis os: An embedded multithreaded operating system for wireless micro sensor platforms[J]. *ACM Kluwer Mobile Network Journal*, 2005(Special Issue on Wireless Sensor Networks): 100-110.
- [15] Beutel J. Fast-prototyping using the BTnode platform[C]//European Design and Automation Association. *Proceedings of the conference on Design, Automation and Test in Europe (DATE '06)*. Leuven Belgium: European Design and Automation Association, 2006: 977-982.
- [16] Baronti P, Pillai P, Chook V W C, et al. Wireless sensor networks: A survey on the state of the art and 802.15.4 and ZigBee standards[J]. *Computer Communications*, 2007, 30(7): 1655-1695.
- [17] IEEE. Wireless Medium Access Control(MAC) and Physical Layer(PHY) Specifications for Wireless Personal Area Networks(WPANs). IEEE Standard 802.15.1[M]. New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2002.
- [18] Morais R, Fernandes M A, Matos S G, et al. A Zigbee multi-powered wireless acquisition device for remote sensing applications in precision viticulture [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2008, 62: 94-106.
- [19] Juels A. RFID security and privacy: A research survey [J]. *Selected Areas in Communications*, 2006, 24(2): 381-394.
- [20] Vellidis G, Tucker M, Perry C, et al. A real-time wireless smart sensor array for scheduling irrigation[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2008, 61: 44-50.
- [21] 李震, Wang N, 洪添胜, 等. 农田土壤含水率监测的

- 无线传感器网络系统设计[J]. 农业工程学报, 2010, 26(2): 212-217.
- [22] Riquelmea L, Sotoa J A, Suardfaza F, et al. Wireless sensor networks for precision horticulture in Southern Spain[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2009, 68(1): 25-35.
- [23] Kotamaki N, Thessler S, Koskiaho J, et al. Wireless in-situ sensor network for agriculture and water monitoring on a river basin scale in Southern Finland: Evaluation from a Data User's Perspective[J]. Sensors, 2009, 9(4): 2862-2883.
- [24] 高峰, 俞力, 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.
- [25] 闻珍霞, 何龙, 杨海清, 等. 发展自动控制精准滴灌技术, 加快节约型农业建设[J]. 农业装备技术, 2010, 36(3): 22-24.
- [26] Kim Y, Evans R G, Iversen W, et al. Instrumentation and control for wireless sensor network for automated irrigation[C]//ASABE. Proceedings of the 2006 ASABE Annual International Meeting. St Joseph MI USA: ASABE, 2006: 061105.
- [27] 冯友兵, 张荣标, 沈敏. 面向精确灌溉的无线传感器网络构建[J]. 农业机械学报, 2009, 40(1): 56-59.
- [28] Liu H, Meng Z J, Cui S H. A wireless sensor network prototype for environmental monitoring in greenhouses[C]//IEEE ComSoc. Wireless Communications, Networking and Mobile Computing. Los Alamitos USA: IEEE Publication, 2007: 2344-2347.
- [29] Beckwith R, Teibel C, Bowen P. Report from the field: Results from an agricultural wireless sensor network[C]//IEEE Computer Society. Proceeding of the 29th Annual IEEE International Conference on Local Computer Networks. Los Alamitos USA: IEEE Publication, 2004: 471-478.
- [30] Li D, Qing N N, Xu B G. Embedded green house monitoring and control system based on wireless sensor network[J]. Instrument Technique and Sensor, 2009(5): 40-42.
- [31] 郭文川, 程寒杰, 李瑞明, 等. 基于无线传感器网络的温室环境信息监测系统[J]. 农业机械学报, 2010, 41(7): 181-185.
- [32] Ng M L, Leong K S, Hall D M, et al. A small passive UHF RFID tag for livestock identification [C]//IEEE. Proceeding of IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communication. Los Alamitos USA: IEEE Publication, 2005: 67-70.
- [33] Nadimi E S, Sogaard H T, Bak T, et al. ZigBee-based wireless sensor networks for monitoring animal presence and pasture time in a strip of new grass[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2008, 61(2): 79-87.
- [34] Darr M J, Zhao L. A model for predicting signal transmission performance of wireless sensors in poultry layer facilities[J]. Transactions of the ASABE, 2008, 51(5): 1817-1827.
- [35] Lowe J C, Abeyesinghe S M, Demmers T G M, et al. A novel telemetric logging system for recording physiological signals in unrestrained animals[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2007, 57(1): 74-79.
- [36] Kwong K H, Goh H G, Michie C, et al. Wireless sensor networks for beef and dairy herd management[C]//ASABE. Proceedings of the 2008 ASABE Annual International Meeting. St Joseph MI USA: ASABE, 2008: 084587.
- [37] Kwong K H, Tsung Ta Wu, Hock Guan Goh, et al. Wireless sensor networks in agriculture: Cattle monitoring for farming industries[J]. Progress In Electromagnetics Research Symposium, 2009, 5(1): 1719-1723.
- [38] 尹令, 刘财兴, 洪添胜, 等. 基于无线传感器网络的奶牛行为特征监测系统[J]. 农业工程学报, 2010, 26(3): 203-208.
- [39] Rebecca N Handcock, Dave L Swain, Greg J, et al. Monitoring animal behaviour and environmental interactions using wireless sensor networks, GPS collars and satellite remote sensing [J]. Sensors, 2009, 9(5): 3586-3603.
- [40] Watanabe T, Sakurai A, Kitazaki K. Dairy cattle monitoring using wireless acceleration-sensor networks [C]//IEEE. Proceedings of IEEE Sensors. Los Alamitos USA: IEEE Publication, 2008: 526-529.
- [41] Nadimi E S, Sogaard H T, Bak T. ZigBee-based wireless sensor networks for classifying the behaviour of a herd of animals using classification trees[J]. Biosystems Engineering, 2008, 100(2): 167-176.
- [42] Wark T, Swain D, Crossman C, et al. Sensor and actuator networks: Protecting environmentally sensitive areas [J]. IEEE Pervasive Computing, 2009, 8(1): 30-36.
- [43] 李锬钰, 高红菊, 姜建钊. 小麦田中天线高度对 2.4 GHz 无线信道传播特性的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(增刊 2): 184-189.
- [44] Vine D L, Karam M. Dependence of attenuation in a vegetation canopy on frequency and plant water content [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1996, 34(5): 1090-1096.
- [45] Li Z, Wang N, Hong T. Radio path-loss modeling for a 2.4GHz in-field wireless sensor network [J]. Transactions of the ASABE, 2010, 53(2): 615-624.
- [46] 李震, 洪添胜, Wang N, 等. 基于神经网络预测的无线传感器网络田间射频信号路径损耗[J]. 农业工程学报, 2010, 26(12): 178-181.

责任编辑: 罗慧敏