

远程控制与无线通信技术在农业中的应用分析与展望

贾敬敦¹ 鲁相洁^{1,2} 黄峰^{1,3} 王兵兵^{1,2} 王现记⁴ 高万林^{1,2}

(1. 中国农业大学农业农村部农业信息化标准化重点实验室, 北京 100083; 2. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083; 3. 中国农业大学理学院, 北京 100083; 4. 海豚数联(北京)科技有限公司, 北京 100080)

摘要: 我国在农业生产中仍然使用传统的生产模式,造成大量人力物力浪费的同时,也不利于农业的可持续性发展。远程控制技术能够自动、高效、精确地控制终端设备,从而将人力从传统的生产方式中解放出来,对农业生产具有十分重要的作用。因此,将现代工业控制技术、无线通信技术以及物联网技术等应用于农业生产中,不仅能改进农业生产管理模式,也可以提高农业生产效率,有助于将现代农业变为智慧农业。通过对国内外农业中应用远程控制技术现状进行综述,并分析和总结了当前农业中所使用远程控制技术存在的问题,同时,归纳总结了 ZigBee、WiFi、LoRa、NB-IoT、5G 等通信技术中存在的问题和解决方案,最后指出 5G 技术缩短了数据获取、传输的时间,扩大了数据采集的空间,将 5G 技术应用到农业远程控制中是未来研究方向,即利用传感器等技术采集数据信息,通过 5G 网络上传到服务器或云端,并对其进行分析处理,从而做出正确的决策。

关键词: 农业远程控制; 无线通信技术; 5G 技术; 综述

中图分类号: TN92 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2021)S0-0351-09

Review of Remote Control Technology and Wireless Communication Technology in Agricultural Applications

JIA Jingdun¹ LU Xiangjie^{1,2} HUANG Feng^{1,3} WANG Bingbing^{1,2} WANG Xianji⁴ GAO Wanlin^{1,2}

(1. Key Laboratory of Agricultural Information Standardization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

3. College of Science, China Agricultural University, Beijing 100083, China

4. Dolphin Shulian (Beijing) Technology Co., Ltd., Beijing 100080, China)

Abstract: Wireless remote control technology plays a very important role in agricultural production, but China still uses the traditional production mode in agricultural production, which will cause a lot of human and material resources waste, at the same time, it is not conducive to the sustainable development of agriculture. Remote control technology can automatically, efficiently and accurately control the terminal equipment, so as to liberate manpower from the traditional mode of production. Therefore, the application of modern industrial control technology, wireless communication technology and Internet of Things technology to agricultural production can not only improve agricultural production management mode, but also can improve agricultural production efficiency, and help to transform modern agriculture into smart agriculture. The application of remote control technology in agriculture at home and abroad was reviewed, and the problems existing in the current use of remote control technology in agriculture were analyzed and summarized. At the same time, the problems and solutions in ZigBee technology, WiFi technology, LoRa technology, NB-IoT technology and 5G technology were summarized. Finally, it was pointed out that the application of 5G technology to agricultural remote control was the future research direction, that was, the use of sensors and other technologies to collect data and information. 5G technology shortened the time for data acquisition and transmission and expanded the space for data collection.

Key words: agricultural remote control; wireless communication technique; 5G technology; review

收稿日期: 2021-07-18 修回日期: 2021-08-29

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFF0213602)

作者简介: 贾敬敦(1963—),男,研究员,博士生导师,主要从事农业和农村发展、区域发展战略等研究,E-mail: 2759349@qq.com

通信作者: 高万林(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事智慧农业、计算机网络信息安全和农业信息化研究,E-mail: caugwl@163.com

0 引言

近年来,我国高度重视农业信息化与现代化发展,无线远程控制技术被广泛应用于农业生产的各个环节,在精准灌溉、精准施肥、病虫害防治、环境智能调控、智慧水产、智慧畜禽业等领域发挥了重要作用。

远程控制,是指管理人员在异地通过计算机网络异地拨号或双方都接入 Internet 等手段,连通需被控制的设备,将被控设备的参数信息显示到客户端上,通过本地客户端对被控设备进行配置、发送指令等操作。远程控制技术在 20 世纪初第一次提出,随着计算机技术、无线通信技术和传感器技术等新兴技术的出现,现在已经被广泛应用于海、陆、空等各个领域,全方面影响着人类生活。利用远程控制技术,可使机器或设备到达人难以到达的恶劣环境,有效降低工作成本,提高工作效率。

本文在总结国内外相关研究的基础上,对农业远程控制与所需的无线通信技术进行论述,分析相关技术存在的问题,并提出解决方案。

1 农业远程控制技术现状

随着工业化与城镇化的不断推进,我国农业劳动力成本日趋增高,农业劳动力老龄化与短缺问题逐渐凸显,“机器换人”的需求日益增加。远程控制技术采用物联网、人工智能、5G 等新一代信息技术,通过对设施、设备等进行远程控制,实现了对温室大棚的远程监控、自动灌溉以及自动施药等。

1.1 国外应用现状

远程控制技术在工农业方面的发展较为丰富,农业方面主要体现在农业生态领域,对农业作业过程进行远程监控,利用传感器采集数据信息,结合数据处理系统,通过互联网技术将数据公有化,实现对实地作业情况监控,不仅节约了人力成本,也提升了对实时地点监控的管理效率^[1-4]。

各国学者对远程控制系统的实现方法做了大量研究,MOGA 等^[5]和 KEERTHI 等^[6]提出了温室远程监控系统,主要是利用光传感器、温度传感器、湿度传感器等传感器设备采集温室内环境数据,管理人员可以有效监视不同环境参数,实现对温室的远程监测,其主要特点是灵活、易于部署、可扩展和低成本。文献[7-10]提出了基于物联网的农田监测和智能灌溉系统,通过无线传感器采集土壤含水率和水位,并将采集到的数据发送到 Web 服务器,管理人员可以通过 Web 界面对终端设备进行远程控制,从而实现自动灌溉,提高水的使用效率。同时,MAT 等^[11]提出了基于无线湿度传感网络的温室管

理系统,根据传感器采集到的数据,对灌溉水泵、空气循环风扇和增加湿度雾化器等设备进行远程控制,证明了闭环系统或自动灌溉比计划灌溉更有效。KHAN^[12]为了解决由于气候变化、传统的施肥和灌溉系统在某些种植地区很难取得成功的问题,开发了基于无线传感器网络模型的水位远程监测系统,利用远程设备对井中水位进行远程监测,可以测量水位和监测水质特征等。KOTHARI 等^[13]将无线远程控制技术应用在农业水泵中,通过基于 GSM 的无线链路控制现场设备,并将传感器采集到的数据传输给 Android 设备,实现对交流电机的远程控制,解决了种植区地形复杂、水泵安装地区不方便操作等问题。SRIVASTAVA 等^[14]设计了一种通过物联网监测和控制土壤水分参数的方法,通过 ZigBee 模块实现数据传输,农民可以远程监测土壤参数,并自动控制土壤的含水率,有助于节约农田灌溉用水,但是,该系统只能控制土壤含水率,其他参数很难控制。

1.2 国内应用现状

随着我国农业科技迅猛发展,智能化农业生产所带来的精细化农业生产已经被越来越多的农业生产者接受并应用到实践当中。祁力钧等^[15]针对温室环境施药劳动强度大,药物对操作人员健康影响严重等问题,开发了在温室中远程控制的自动施药系统,利用 GPRS 通信技术、集散控制原理、自动控制等技术,对温室群内弥雾机远程控制,实现了操作人员与作业现场的隔离。郑人文等^[16]和韦明峥等^[17]设计了温室大棚远程控制系统,通过 ZigBee 网络将传感器采集的数据发送到控制端,用户可以进行自动监控,对温室内环境进行补偿,提高了温室种植的信息化水平。曹靖等^[18]利用智能控制、传感器、无线自组网等信息技术,开发了应用于农业水肥一体化的智能灌溉控制系统,该系统能够适用于复杂地形,而且通过装置自组网,可以实现大面积灌溉。周俊平^[19]根据植保机飞控系统工作原理及控制执行流程,考虑参数稳定及补偿算法,建立了植保机远程控制模型。时生乐等^[20]结合 LoRa 无线通信技术,设计了智慧农业监控系统,可以远程实时采集农作物生长数据,并进行转换、处理,通过对处理后的数据进行挖掘分析,实现对农作物的远程控制。王庐山^[21]设计的智能农业灌溉系统将 Android 手机作为移动控制端,上位机与单片机控制单元通过 WiFi 通信,从而实现 Android 端对水泵自动灌溉的远程控制。吴昊等^[22]设计了基于 MQTT 的低功耗智能灌溉系统,利用 MQTT 通信技术搭配无线通信技术和嵌入式设计,对节水灌溉阀门进行信息采集

和远程控制,实现了远距离、异地农场灌溉,解决了大规模农场水资源智能管理问题。孟艳艳等^[23]设计了基于物联网的普通温室大棚温度和土壤湿度智能管理系统,应用 4G 和以太网等远程通信方式,通过手机终端和触摸控制屏来显示环境信息和远程控制,实现了集中管理控制。张青等^[24]设计了移动和远程遥控为一体的移动式灌溉施肥机,其能够准确移动至所需灌溉区域,进行手动或远程控制灌溉,实现了汽油泵、肥料罐开关和灌溉片区选择的远程控制。王昊宇等^[25]设计的基于 ESP8266 开发板的温室大棚远程监控系统,通过 WiFi 网络,实现温室大棚内相关设备和手机 APP 的数据交互,监控人员可以通过手机 APP 查看大棚环境信息,并可远程控制大棚内设备工作。高子航^[26]设计了面向温室大棚的 5G 机器人定位系统,该系统由 SLAM 中心模块、远程控制模块、云检测模块和移动监控模块 4 部分构成,完整实现了温室大棚动态定位的功能要求,摆脱了固定监测网络的位置限制。

1.3 目前存在的问题

目前,我国在远程控制技术方面的研究虽然已经取得很多成果,但是结合以上研究现状分析,我国农业远程控制系统的调控水平、终端通信设计主要还存在以下问题:

- (1)应用客户端远程管理功能设计不优
- 目前大多数温室大棚的控制系统只能通过计算

机远程查看和控制,能实现随时随地远程监控的系统并不多。

(2)网络通信性能不优

我国大多数的温室大棚都是基于局域网通信,但在我国农村大多数种植地区没有局域网,并且目前现场通信模块、客户端与服务器端建立通信的协议并未达到最佳的用户体验。无线通信过程中易受到各种已知或未知因素的影响,需要进一步增强无线通信防干扰和抗干扰的能力。

(3)与 IoT、云服务等先进技术的融合度不优

温室大棚的控制管理主要依赖传统经验,现有的监测控制系统对环境参数的采集不够精准,没有 在应用层结合先进的云端技术。

(4)数据采集不够准确

由于环境复杂多变,实验过程充满挑战,缺少大量科学数据支撑,需要进行大量的田间实验,获得更准确的数据。

2 远程控制的关键通信技术

农业物联网信息传输方式主要为有线通信和无线通信,常见的有线通信技术有电力载波、光纤通信、现场总线技术、程控交换技术等;无线通信技术包括 ZigBee、5G、WiFi、LoRa 和 NB-IoT 等技术。对农业中常用的无线通信技术进行分析和对比,如表 1 所示。

表 1 无线通信技术对比

Tab.1 Comparison of wireless communication technologies

参数	ZigBee	5G	WiFi	LoRa	NB-IoT
传输速度/($\text{kb}\cdot\text{s}^{-1}$)	10 ~ 250	$< 1.05 \times 10^7$	$1.13 \times 10^4 \sim 5.53 \times 10^4$	0.3 ~ 50	< 100
通信距离(直径)/km	< 1	0.1 ~ 0.3	0.02 ~ 0.2	1 ~ 15	< 10
频段/GHz	2.4	30 ~ 300	2.4		0.15 ~ 1
安全性	中等	高	低	高	低
国际标准	IEEE 802.15.4	eMBB	IEEE 802.11b IEEE 802.11g	IEEE 802.15.4g	
功耗/mA	5	15	10 ~ 50	10	2.28
成本/美元	4	59	25	4	5 ~ 10
农业主要应用场景	农业大棚智能控制、自动灌溉、环境监测等	无人驾驶农机、无人机施药、杂草和农作物监测、昆虫追踪等	农业的生态信息自动监测、环境自动控制和智能化管理	数据信息采集、实时数据分析、自动灌溉、自动喷药等	农田环境数据采集、节水灌溉等

2.1 ZigBee 技术

2.1.1 ZigBee 技术概述

ZigBee 是无线传感器网络中使用最广泛的收发器标准之一^[27],基于 IEEE 802.15.4 标准,是一种低成本、低功耗和更小延迟的双向无线通信技术,被广泛应用于智能家电、农林业、水务、环境保护、工业自动化、数字化医疗等方面^[28-36]。ZigBee 网络以每一个孤立的节点为基础,依靠无线通信方式,形成

3 种网络拓扑结构:星型拓扑结构、树状拓扑结构和网状拓扑结构,如图 1 所示^[37-38]。

在温室大棚监控系统中,通过 ZigBee 组网实时传递传感器采集到的数据,有助于对农作物进行环境远程监测和控制,从而设置适宜农作物生长的环境参数;在智能灌溉系统中,可以通过 ZigBee 网络实现服务器和终端设备间的数据交互,从而实现用户对灌溉系统的远程控制,ZigBee 技术在农业中应

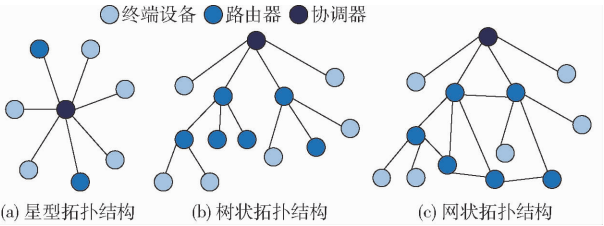


图1 ZigBee网络拓扑结构图

Fig.1 Zigbee network topology diagram

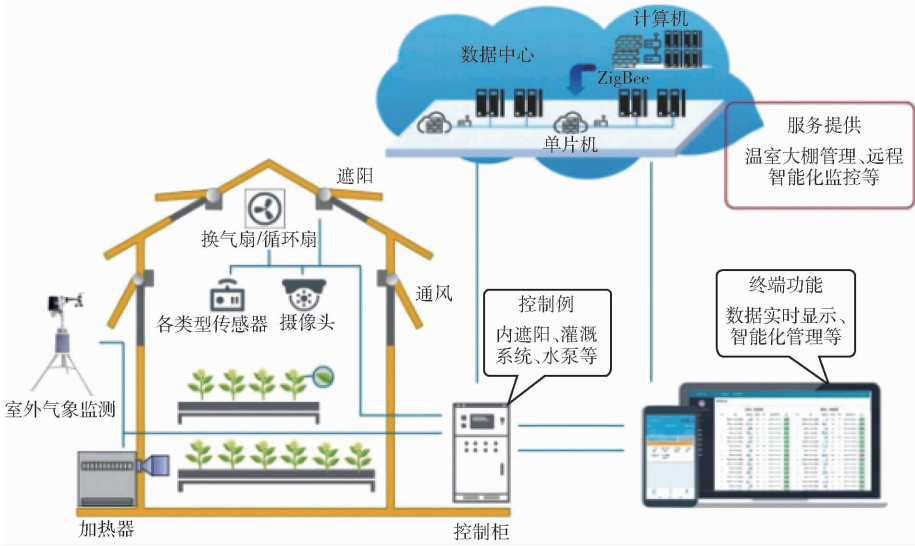


图2 ZigBee技术在农业智能大棚自动化监控系统应用示意图

Fig.2 Schematic of application of ZigBee technology in automatic monitoring system of agricultural intelligent greenhouses

- (2)通信稳定性较弱
- ZigBee采用信号反射进行传输,在此期间,由于有障碍物的遮挡,信号将会减弱。
- (3)使用电池驱动难以保证网络节点正常运行
- ZigBee的每个网络节点都要进行信息采集和数据传输。此时,网络节点的收发器处于收发状态,其最低功耗至少20 mA,使用放大器的网络节点功耗一般是150 mA,因此,使用电池驱动来保证网络节点的正常运行是困难的。
- (4)ZigBee技术成本和工作量难以降低
- ZigBee中的每个节点都参与自动组网和动态路由,所以每个网络节点的单片机都比较复杂,成本也比较高。

2.2 WiFi技术

2.2.1 WiFi技术概述

WiFi基于IEEE 802.11协议,其覆盖范围广,信息传输速率快,可实现局部区域内的高速无线连接。2016年最新公布的802.11ah WiFi标准的覆盖范围可达到1 km,信号更强,且不容易被干扰^[40]。目前,WiFi技术是使用最为广泛的无线通信技术之一,具有很多优势:普及面比较广,设备价格相对低廉,使用成本较低;组网方便,连接简单,通信协议统一使用

用如图2所示^[39]。

2.1.2 ZigBee技术存在的问题

虽然ZigBee技术有很大的发展前景,但也存在许多并未解决的难点:

(1)动态组网和动态路由

ZigBee网络中的节点实时变化,网络中每个节点相隔一定的时间,需要通过无线信号重新组网,会增加数据传输时延。

- TCP/IP协议;传输速度快,目前最快速度可达数百兆;能够直接接入互联网;通信距离长达305 m,在封闭区域内可达100 m且不需要布线^[41-43]。
- 2.2.2 WiFi网络中存在的问题及应对措施
- 在互联网技术发展过程中,WiFi已被广泛应用到各种场合,但其也存在很多缺陷,如稳定性弱,缺乏完善的安全机制,比较容易被攻击破解;对硬件要求较高,WiFi模组需要大量周边辅助电路;连接设备数量较少,一般局限于数十台设备;WiFi技术在使用过程中需要较高的功耗;容易受网络病毒的攻击,被网络窃听等^[44-47]。

为了保证WiFi无线网络技术的安全使用,保证合法用户的信息安全,要采取一定的安全方案,主要有以下4个方面^[48]:

(1)严格访问控制

通过划分不同的权限来限定登陆者的访问权限,从而保证对不同安全级别信息的分层保护。

(2)防止DOS攻击

通过对无授权用户限制使用带宽可以有效提升安全系数,可以通过使用SSID访问控制。

(3)定期进行站点审查

通过接收天线等设备找到未授权的非法网站,

抑制入侵者的入侵行为。

(4) 链路保护

采用无线加密协议对无线网络信息加密,加强对无线链路的监测力度。

2.3 LoRa 技术

LoRa 是基于 Sub-GHz 频段的低功耗广域网通信技术,解决了传统无线通信技术无法同时兼顾通信距离和功耗的难题,具有广泛的应用前景^[49],具有以下优势^[50]:

(1) 低功耗

休眠模式下传感器不工作,消耗电流为 4 μ A,接收模式下电流仅为 10 mA,且 LoRaWAN 可以根据信号强弱自动调节并降低发射功率,延长电池使用寿命。

(2) 通信距离远

LoRa 使用以带宽换功率和信噪比的扩频技术,其扩频增益可补偿传播距离。在开阔的空旷地带通信距离最远可达 15 km,通过网关可以对大区域实现无线网络覆盖。

(3) 成本低

LoRaWAN 支持公共网络开放认证,易实现互通且无通信资费,芯片成本约 4 美元,价格便宜,降低了节点成本。

(4) 可靠性高

具有前向纠错技术,可纠正传输中增加的错误信息,提高数据可靠性。

(5) 抗干扰能力强

LoRa 工作在较低频段,使得其在空气中直线传播衰减更小。LoRa 通过增加扩频因子将数据范围扩大,方便数据在噪声中识别,其扩频调制技术增加了系统稳定性和抗干扰能力。

(6) 易于部署和扩展

系统容量大,可部署数万个终端节点,支持额外扩展,允许随时增加网关数量,采用星型拓扑,结构简单,方便在条件不便的地域进行系统搭建。

LoRa 技术解决了农业场景中面积大、多在偏僻地区且移动信号差的问题,将其应用于农业大棚监控系统中,可以实现对大棚内温度、湿度、CO₂ 浓度、光照强度等环境因子的远程监控,并实时自动调整,解决传输不稳定和控制效率低等问题;在水产养殖中,可以监测水体环境因子,如水体溶解氧含量、盐度、pH 值、温度等,增强了远距离水质监测技术的可靠性,解决了实时测量中监测数据难于长距离传输和数据同步展示的问题。其在农业中应用示意图如图 3 所示。

2.4 NB-IoT 技术

NB-IoT 是基于蜂窝网络的窄带物联网技术,



图 3 LoRa 技术在农业中应用示意图

Fig. 3 Application of LoRa technology in agriculture

能在全球广泛部署,聚焦于低功耗广域网,基于授权频谱的运营,可直接部署于 LTE 网络,具备较低的部署成本和平滑的升级能力^[51]。NB-IoT 体系架构如图 4^[52]所示,主要分为 5 部分:NB-IoT 终端、基站、物联网核心网、物联网平台(云平台)、第三方应用。其有 3 种部署方式:独立部署、保护带部署和带内部署^[53]。

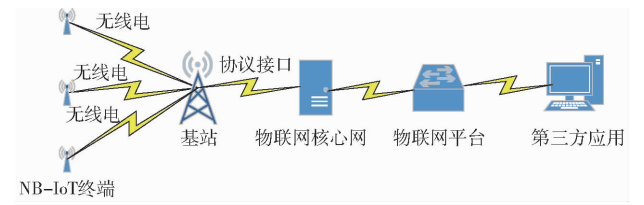


图 4 NB-IoT 基本架构图

Fig. 4 NB-IoT basic architecture

NB-IoT 具有 4 个主要特点^[54]:

(1) 信号覆盖广:NB-IoT 有更好的覆盖能力(20 dB 增益),就算水表埋在井盖下面,也不影响信号收发。

(2) 功耗低:NB-IoT 以速率换回更低的功耗,部分 NB 终端待机时间可以达到 10 年。

(3) 连接数量大:NB-IoT 一个扇区能够支持 10 万个连接,单个基站最多可接入 5 万个终端。

(4) 成本低:通信模块成本很低,每个模组有望降到 5 美元之内甚至更低,有利于大批量采购和使用。

NB-IoT 技术应用于农业物联网中,为农业物联网提供了技术支持并促进了其发展。NB-IoT 完善了农业物联网的发展模式,通过信息传导设备对农作物或农田进行实时监控,了解农作物的生长状况,从而调整种植技术及种植方式。NB-IoT 技术优化了农业物联网的构成,提升了农业物联网的技术,使农业物联网更加符合农村当前的发展前景。NB-IoT 技术促成了农业物联网智能化形成,NB-IoT 网络层通过对农业生产过程中的信息进行收集,并通过应用层进行整理与分析,从而促使农业物联网做出智能化的处理^[55]。

2.5 5G 通信技术

2.5.1 5G 通信技术概述

5G 是指第 5 代移动通信技术,具有高速率、低时延、大连接技术优势^[56-59]。首先,5G 的数据传输速率

最高可达 10 Gb/s,可以实现摄像头视频数据的瞬间传输^[60];其次,超低的网络延迟,低于 1 ms;最后,海量设备连接能力,可以提供千亿级设备连接能力^[61],农业领域应用典型场景网络性能需求如表 2 所示。

表 2 农业领域应用典型场景网络性能需求

Tab.2 Network performance requirements of typical scenarios in agricultural field

应用场景	场景描述	整体需求	网络需求		
			网络双向时延/ms	带宽/(Mb·s ⁻¹)	可靠性/%
目标与环境识别	大数据流量监控	大宽带,多并发	<200	2~4	90
信息采集与服务	低功耗传感器通信数据采集	多并发	尽量保障	尽量保障	90
远程设备操控	设备操控(控制部分)	超低时延、高可靠	<18	0.05~0.1	99.999
	设备操控(视频部分)	低时延、高可靠、大宽带	<50	30~100	99.9
	无人机	低时延、高可靠、大宽带、多客户端、大范围运动	<20	>50(上行速率)	99.999

5G 技术通过对其体系架构的改进,大幅提高了系统的性能^[62-63]。5G 技术在农业现代化领域的应用场景主要有智能农业机器人、农业无人机、智慧养殖技术、农业航空、数字农村等。通过运用 5G 技术,实现高清图像处理、智能云端运算,处理多种数据和信号,提高了数据传输过程中的可靠性和高效性^[64-65]。

在农业生产中,生产者通过传感器采集农作物的信息数据,利用 5G 网络将这些数据上传到服务器或云端,并对数据进行分析处理,从而得到合适的解决方案;同时,无人驾驶农机可利用 5G 网络实时向控制端传输信息,并及时响应控制端的指令。5G 技术在农业现代化领域具有重要意义,其在农业中的应用示意图如图 5 所示。5G 的应用,可以提高作物产量,降低成本消耗,也可以极大地提高农业生产效率和农业生产力。

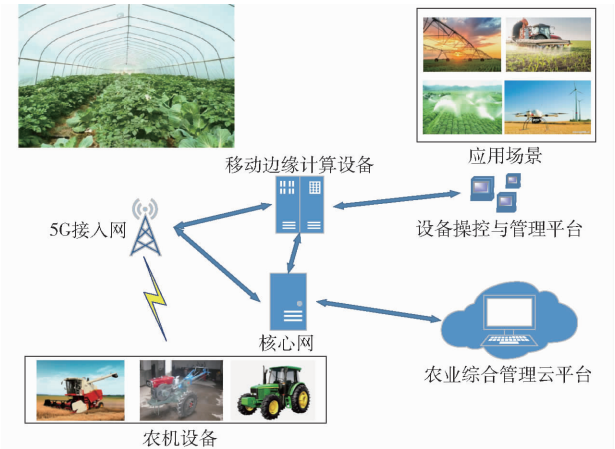


图 5 5G 技术在农业中应用示意图

Fig.5 Application diagram of 5G technology in agriculture

2.5.2 5G 通信技术存在的问题

5G 技术被视为未来几年最具前瞻性的技术,其将驱动全社会数字化转型,实现产业融合,但是,在带来极大便利的同时,也存在着一些亟待解决的

问题。

(1) 信息安全问题

新云和虚拟化技术的引入将带来网络开放性,可编排附带的潜在安全威胁;同时,切片技术引入 5G 架构带来跨域、跨层的安全风险^[66]。

(2) 移动宽带增强

由于 5G 的移动宽带增强,数据传输速率和容量高,因此,5G 需要更多密集的小基站,但密集组网的方式将会产生更大的安全威胁^[67]。

(3) 移动终端问题

5G 通信技术融合了多种新型技术,对移动终端的待机时间也提出了新的要求,因此,需要建立移动终端防护体系^[68]。

3 总结与展望

近年来,无线传感网络得到了大量应用,但在农业中应用还不足。经查阅大量文献发现,在农业中应用远程控制技术是目前研究的大热门,其中以 ZigBee 技术为基础的远程监控系统占多数,远程控制是未来农业的发展方向。针对宽带、时延、可靠性、安全性等特殊需要,5G 网络利用其灵活组网的优势,可以提供服务质量、网络切片、边缘云服务、边缘计算等特定服务内容,从多个层面促进农业生产的智慧化发展。因为 5G 可以提供低时延、高可靠服务,所以为物联网时代万物互联提供了更好的通信基础,在农业中应用 5G 技术,可以推动农业装备智能化、管理决策智慧化,如温室大棚中通过对传感器采集到的数据进行分析,采用合适的解决方案;在无人农机中利用 5G 技术,可以降低时延,实时向管理员提供障碍数据。由于受到管理人员技术素质的制约,远程控制意味着工作人员必须拥有扎实的专业知识、丰富的经验和高度的责任感,但我国相应的管理制度还未完善。

参 考 文 献

- [1] 徐正华. 基于 Android 系统的温室环境监控 APP 研究与开发[D]. 洛阳:河南科技大学,2015.
- [2] 杨春俊,沈朗,赵敏,等. 草莓种植中物联网技术的应用分析[J]. 中国高新技术企业,2016(35):48-49.
- [3] 张怡卓,刘步玉,马琳. BP-PID 控制方法在变量施肥控制系统中的应用[J]. 现代电子技术,2012,35(5):192-194.
- [4] 赵璞,朱孟帅,秦波,等. 农业 APP 研究进展及展望[J]. 农业展望,2016,12(2):59-64.
ZHAO Pu, ZHU Mengshuai, QIN Bo, et al. Research advance and outlook of APP in agriculture[J]. Agricultural Outlook, 2016,12(2):59-64. (in Chinese)
- [5] MOGA D, PETREUS D, STROIA N. A low cost architecture for remote control and monitoring of greenhouse fields[C]//Industrial Electronics & Applications. IEEE,2012:1940-1944.
- [6] KEERTHI V, KODANDARAMAIAH D. Cloud IoT based greenhouse monitoring system [J]. International Journal of Engineering Research and Applications, 2015,5(10):35-41.
- [7] PARAMESWARAN G, SIVAPRASATH K, SYSTEM P. Arduino based smart drip irrigation system using Internet of Things [J]. International Journal of Engineering Science and Computing, 2016,6(5):5518-5521.
- [8] KHELIFA B, AMEL D, AMEL B, et al. Smart irrigation using Internet of Things[C]//International Conference on Future Generation Communication Technology. IEEE,2015:1-6.
- [9] HEMALATHA R, DEEPIKA G, DHANALAKSHMI D, et al. Internet of Things (IoT) based smart irrigation[J]. International Journal of Advanced Research in Biology Engineering Science and Technology (IJARBEST), 2016,2(2):128-132.
- [10] RAJALAKSHMI P, MAHALAKSHMI S D. IoT based crop-field monitoring and irrigation automation [C]//2016 10th International Conference on Intelligent Systems and Control (ISCO). IEEE, 2016:1-6.
- [11] MAT I, KASSIM M, HARUN A N, et al. IoT in precision agriculture applications using wireless moisture sensor network[C]//2015 IEEE 12th Malaysia International Conference on Communications (MICC). IEEE, 2017:24-29.
- [12] KHAN S. Wireless sensor network based water well management system for precision agriculture[C]//2016 26th International Telecommunication Networks and Applications Conference (ITNAC). IEEE, 2016:44-46.
- [13] KOTHARI D, PARAKH A. Application of wireless technologies in agricultural pumps [C]//2017 International Conference on Computation of Power, Energy Information and Commuication (ICCPEIC). IEEE, 2017:75-84.
- [14] SRIVASTAVA A, DAS D K, KUMAR R. Monitoring of soil parameters and controlling of soil moisture through IoT based smart agriculture[C]//2020 IEEE Students Conference on Engineering & Systems (SCES). IEEE, 2020:1-6.
- [15] 祁力钧,杜政伟,冀荣华,等. 基于 GPRS 的远程控制温室自动施药系统设计[J]. 农业工程学报,2016,32(23):51-57.
QI Lijun, DU Zhengwei, JI Ronghua, et al. Design of remote control system for automatic sprayer based on GPRS in greenhouse[J]. Transactions of the CSAE, 2016,32(23):51-57. (in Chinese)
- [16] 郑人文,胡文锋,方纪华. 温室大棚远程综合自动控制系统设计[J]. 热带农业工程,2017,41(4):36-42.
ZHENG Renwen, HU Wenfeng, FANG Jihua. Design of remote integration automatic control system for greenhouse[J]. Tropical Agricultural Engineering, 2017,41(4):36-42. (in Chinese)
- [17] 韦明峥,凌加平,周俊男,等. 基于物联网的智能蔬菜大棚远程控制系统研究[J]. 科技风,2020(32):12-13.
- [18] 曹靖,宋娇红,王冰. 农业水肥一体化智能灌溉控制系统开发与应用[J]. 中国农业信息,2019,31(6):116-122.
CAO Jing, SONG Jiaohong, WANG Bing. Development and application of intelligent irrigation control system in agricultural water and fertilizer integration[J]. China Agricultural Information, 2019,31(6):116-122. (in Chinese)
- [19] 周俊平. 农用无人植保机远程控制系统操作终端设计[J]. 农机化研究,2020,42(12):101-106.
ZHOU Junping. Operating terminal design for the remote control system of agricultural plant protection unmanned aerial vehicle [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020,42(12):101-106. (in Chinese)
- [20] 时生乐,魏素盼. 基于 LoRa 技术的智慧农业监控系统研究[J]. 时代农机,2020,47(2):105-106.
- [21] 王庐山. 基于 Android 手机与单片机的智能农业灌溉系统设计[J]. 南方农机,2020,51(11):15,17.
- [22] 吴昊,王鹤,刘杰,等. 基于 MQTT 的低功耗智能灌溉系统设计[J]. 信息通信,2020(7):117-118.
- [23] 孟艳艳,陈伟海,贾长洪,等. 智能控制系统在普通温室大棚中的应用[J]. 中国高新科技,2020(23):110-114.
- [24] 张青,栗方亮,孔庆波. 移动式灌溉施肥机设计[J]. 农业工程,2020,10(12):28-31.
ZHANG Qing, LI Fangliang, KONG Qingbo. Design on mobile fertilizer irrigation machine[J]. Agricultural Engineering, 2020,10(12):28-31. (in Chinese)
- [25] 王昊宇,李国利,周创,等. 基于 ESP8266 的温室大棚远程监控系统设计[J]. 科技创新与应用,2021(6):53-56.
- [26] 高子航. 一种面向温室大棚的 5G 机器人定位系统[J]. 电子技术,2021,50(2):128-129.
GAO Zihang. Study on 5G robot positioning system for greenhouse[J]. Electronic Technology, 2021,50(2):128-129. (in Chinese)
- [27] RAMYA C M, SHANMUGARAJ M, PRABAKARAN R. Study on ZigBee technology[C]//2011 3rd International Conference on Electronics Computer Technology. IEEE, 2011,6:297-301.
- [28] 朱涛. 基于 ZigBee 技术的智能农业温控系统实现[J]. 电脑知识与技术,2019,15(24):229-230,239.

- ZHU Tao. Intelligent agricultural temperature control system based on ZigBee technology[J]. Computer Knowledge and Technology, 2019,15(24):229-230,239. (in Chinese)
- [29] 王春萌, 张大鹏. Zigbee 技术在农业领域的应用[C]//第一届国际计算机及计算技术在农业中的应用研讨会暨第一届中国农村信息化发展论坛, 2007:251-254.
- [30] ÜNAL İ. Integration of ZigBee based GPS receiver to CAN network for precision farming applications[J]. Peer-to-Peer Netw. Appl., 2020,13:1394-1405.
- [31] RAJESHKUMAR S M, HABIBMIYA M S. Wireless data acquisition system using the fusion of ZigBee technology and LabVIEW[C]//2014 International Conference for Convergence of Technology (I2CT). IEEE, 2014:1-6.
- [32] 陈坤铭, 亓相涛. 基于 ZigBee 技术的智能农业大棚设计[J]. 电脑知识与技术, 2017,13(21):176-178.
CHEN Kunming, QI Xiangtao. Design of intelligent agriculture greenhouses based on ZigBee technology[J]. Computer Knowledge and Technology, 2017,13(21):176-178. (in Chinese)
- [33] 肖玥. ZigBee 技术在智能化农业大棚监控系统中的应用研究[J]. 湖北农机化, 2019(16):48-49.
- [34] 吴林. 基于 ZigBee 的农业信息系统研究[J]. 数字通信世界, 2019(7):128-129.
- [35] 孟成伟, 李湘球, 彭君, 等. 一种农业物联网无线通信控制器的设计[J]. 农家科技(下旬刊), 2020(6):251-252.
- [36] OMPAL, MISHRA V M, KUMAR A. ZigBee internode communication and FPGA synthesis using mesh, star and cluster tree topological chip[J]. Wireless Personal Communications, 2021,19(4):1-19.
- [37] 胡霸桥. 基于 ZigBee 技术的农业大棚环境温度监测系统的设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2012.
- [38] QIU Weimin, DONG Linxi, WANG Fei, et al. Design of intelligent greenhouse environment monitoring system based on ZigBee and embedded technology[C]//IEEE International Conference on Consumer Electronics-China. IEEE, 2015:1-3.
- [39] 刘元刚, 熊刚. 面向设施农业的 ZigBee 技术在大棚自动化监控系统中的应用与实现[J]. 热带农业科学, 2020,40(12):97-102.
LIU Yuangang, XIONG Gang. Application and realization of ZigBee-based automatic monitoring system for protected agriculture in greenhouse[J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 2020,40(12):97-102. (in Chinese)
- [40] 戴慧玲, 王治夏, 杨士坤, 等. 浅谈无线通信技术在车联网中的应用[J]. 数字通信世界, 2021(4):51-53.
DAI Huiling, WANG Zhixia, YANG Shikun, et al. On the application of wireless communication technology in the internet of vehicles[J]. Digital Communication World, 2021(4):51-53. (in Chinese)
- [41] 马超, 顾晓峻, 李彬. 无线通信技术在轨道交通中的应用[J]. 智能城市, 2021,7(6):163-164.
- [42] 赵金涛. 基于 Wifi 农田自动灌溉系统的设计与应用[D]. 北京: 中国矿业大学, 2020.
- [43] 邱彩虹, 苏文青, 陈家明, 等. 基于 WiFi 的室内智能蔬菜无土栽培结构设计[J]. 中国农学通报, 2019,35(4):125-129.
QIU Caihong, SU Wenqing, CHEN Jiaming, et al. A structure design based on WiFi for indoor intelligent vegetable soilless cultivation[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2019, 35(4):125-129. (in Chinese)
- [44] 谢鑫. 无线通信技术在工程机械中的应用[J]. 造纸装备及材料, 2021,50(2):99-100,114.
- [45] 耿启龙. 不同无线通信技术在智能家居中的运用[J]. 电子技术与软件工程, 2021(3):20-21.
- [46] 周雅承. 无线通信技术在精准农业中的应用[J]. 农家参谋, 2020(24):231.
- [47] 王蓓. 论 WIFI 无线网络技术及安全问题[J]. 信息记录材料, 2019,20(5):247-248.
- [48] 潘泰才, 彭宇. 基于 WIFI 技术的无线网络安全问题及对策[J]. 中国新通信, 2018,20(13):145-146.
- [49] 任朝阳, 张平川, 王梦冉, 等. 基于 LoRa 技术的果园物联网系统[J]. 物联网技术, 2021,11(3):74-75,77.
- [50] 陈仕林, 张景浩, 戴子正, 等. 基于 LoRa 的户外农业监测系统的设计[J]. 现代计算机, 2020(32):99-104.
CHEN Shilin, ZHANG Jinghao, DAI Zizheng, et al. Design of outdoor agriculture monitoring system based on LoRa[J]. Modern Computer, 2020(32):99-104. (in Chinese)
- [51] 王英强, 张卫钢, 王红刚. 基于 NB-IoT 的农业数据采集系统的设计[J]. 计算机技术与发展, 2020,30(2):206-210.
WANG Yingqiang, ZHANG Weigang, WANG Honggang. Design of agricultural data acquisition system based on NB-IoT[J]. Computer Technology and Development, 2020,30(2):206-210. (in Chinese)
- [52] 张永强, 高尚, 石莹, 等. NB-IoT 技术特性及应用[J]. 计算机技术与发展, 2020,30(7):51-55.
ZHANG Yongqiang, GAO Shang, SHI Ying, et al. NB-IoT technical features and applications[J]. Computer Technology and Development, 2020,30(7):51-55. (in Chinese)
- [53] 闫秀婧. 基于 NB-IoT 技术的林区监控物联网构建[J]. 林业科技通讯, 2020(10):66-68.
- [54] 石贵民, 张为慧, 余文森. 融合 ZigBee 和 NB-IoT 的农业物联网架构设计及应用[J]. 佛山科学技术学院学报(自然科学版), 2020,38(6):32-38.
SHI Guimin, ZHANG Weihui, YU Wensen. Design and application of agricultural IoT system framework integrating ZigBee and NB-IoT[J]. Journal of Foshan University(Natural Science Edition), 2020,38(6):32-38. (in Chinese)
- [55] 王纯龙, 李贺强. NB-IoT 的关键技术及在农业物联网中的应用[J]. 电子技术与软件工程, 2017(16):20.
- [56] 于洪蕊. 物联网环境下的 5G 通信技术应用[J]. 电子世界, 2021(6):5-6.
- [57] 张朝阳, 李星宏. 5G 在无人驾驶汽车中的应用前景分析[J]. 无人系统技术, 2019(2):65-68.
ZHANG Chaoyang, LI Xinghong. Analysis of the application prospect of 5G in driverless cars[J]. Unmanned Systems Technology, 2019(2):65-68. (in Chinese)

- [58] 尹训俊,郭晓林. 基于 5G 通信技术下的汽车无人驾驶技术探讨[J]. 汽车实用技术,2020(12):15–17.
YIN Xunjun, GUO Xiaolin. Discussion vehicle driverless technology based on 5G communication technology[J]. Automobile Technology,2020(12):15–17. (in Chinese)
- [59] 中国乡村之声. “5G+农业”将如何改变我们的未来[J]. 农家之友,2019(6):20–21.
- [60] HSU C K, CHIU Y H, WU K R, et al. Design and implementation of image electronic fence with 5G technology for smart farms[C]//IEEE VTS Asia Pacific Wireless Communications Symposium, 2019:1–3.
- [61] 孙涛,沈开基,顾蔚,等. 5G+物联网环境下智能金融场景应用的分析与建议[J]. 现代管理科学,2021(2):104–111.
SUN Tao, SHEN Kaiji, GU Wei, et al. Analysis and suggestions of intelligent financial application in 5G+IoT environment [J]. Modern Management Science, 2021(2):104–111. (in Chinese)
- [62] 聂鹏程,张慧,耿洪良,等. 农业物联网技术现状与发展趋势[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版),2021,47(2):135–146.
NIE Pengcheng, ZHANG Hui, GENG Hongliang, et al. Current situation and development trend of agricultural Internet of Things technology[J]. Journal of Zhejiang University (Agriculture & Life Sciences), 2021,47(2):135–146. (in Chinese)
- [63] 石静静,宋旭光,梁冰,等. 空天地一体化在 5G+垂直行业中的应用研究[J]. 长江信息通信,2021,34(2):217–219.
- [64] 杨珺菲. 浅谈 5G 推动下的农业现代化发展现状与前景[J]. 南方农机,2021,52(3):13–15.
YANG Junfei. Analysis of the current situation and Prospect of agricultural modernization driven by 5G[J]. South Agricultural Machinery,2021,52(3):13–15. (in Chinese)
- [65] 马艳红. 5G 技术引领下的智慧果树林业探讨[J]. 农业工程技术,2021,41(3):45–46.
- [66] 杨浩. 浅谈 G 时代移动通信技术的安全性[J]. 科技经济导刊,2021,29(12):56–57.
- [67] 程云飞. 5G 移动通信技术安全问题[J]. 通信电源技术,2020,37(16):145–147.
CHENG Yunfei. Security issues of 5G mobile communication technology[J]. Telecom Power Technologies, 2020,37(16):145–147. (in Chinese)
- [68] 黄宗伟. 5G 通信技术若干关键问题研究[J]. 信息通信,2019(8):207–208.

(上接第 309 页)

- [16] YANG J, HONAVAR V. Feature subset selection using a genetic algorithm [J]. IEEE Intelligent Systems & Their Applications, 2002, 13(2):44–49.
- [17] MIRJALILI S, LEWIS A. The whale optimization algorithm[J]. Advances in Engineering Software, 2016, 95: 51–67.
- [18] PETER A G. General least-squares smoothing and differentiation by the convolution (Savitzky–Golay) method[J]. Analytical Chemistry, 1990, 62(6):570–573.
- [19] 蔡天净,唐瀚. Savitzky–Golay 平滑滤波器的最小二乘拟合原理综述[J]. 数字通信, 2011(1):65–70,84.
- [20] ZHANG Y, LI M Z, ZHENG L H, et al. Soil nitrogen content forecasting based on real-time NIR spectroscopy[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 124:29–36.
- [21] HAVLIN J L, TISDALE S L, NELSON W L, et al. Soil fertility and fertilizers: an introduction to nutrient management[M]. 7th Edition. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2004.
- [22] HORLER D N H, DOCKRAY M, BARBER J. The red edge of plant leaf reflectance[J]. International Journal of Remote Sensing, 1983, 4(2):273–288.
- [23] GITELSON A A, MERZLYAK M N, LICHTENTHALER H K. Detection of red edge position and chlorophyll content by reflectance measurements near 700 nm[J]. J. Plant Physiology, 1996, 148(3–4):501–508.
- [24] FILELLA I, PENUELAS J. The red edge position and shape as indicators of plant chlorophyll content, biomass and hydric status. [J]. International Journal of Remote Sensing, 1994, 15(7):1459–1470.
- [25] DAS R. Photovoltaic devices using photosynthetic protein complexes[D]. Massachusetts Institute of Technology, 2004.
- [26] 龙文,伍铁斌. 协调探索和开发能力的改进灰狼优化算法[J]. 控制与决策, 2017, 32(10):1749–1757.
LONG Wen, WU Tiebin. Improved grey wolf optimization algorithm coordinating the ability of exploration and exploitation[J]. Control and Decision, 2017, 32(10):1749–1757. (in Chinese)
- [27] 钟明辉,龙文. 一种随机调整控制参数的鲸鱼优化算法[J]. 科学技术与工程, 2017,17(12):68–73.
ZHONG Minghui, LONG Wen. Whale optimization algorithm based on stochastic adjustment control parameter[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(12):68–73. (in Chinese)
- [28] NASIRI J, KHIYABANI F M. A whale optimization algorithm (WOA) approach for clustering[J]. Cogent Mathematics & Statistics, 2018, 5(1):1483565.
- [29] LIU H, ZHU H, WANG P. Quantitative modelling for leaf nitrogen content of winter wheat using UAV-based hyperspectral data[J]. International Journal of Remote Sensing, 2017, 38(8–10):2117–2134.
- [30] WANG R, SONG X, LI Z, et al. Estimation of winter wheat nitrogen nutrition index using hyperspectral remote sensing[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(19):191–198.