

# 认知农业物联网实施架构设计

刘卫<sup>1</sup>, 富爽<sup>1\*</sup>, 王金金<sup>2</sup>, 顾环宇<sup>3</sup>

<sup>1</sup>黑龙江八一农垦大学电气与信息学院信息与电气工程学院, 黑龙江 大庆

<sup>2</sup>网易有道信息技术(北京)有限公司, 北京

<sup>3</sup>中国卫通集团股份有限公司, 北京

Email: \*fushuang\_dq@163.com

收稿日期: 2020年11月28日; 录用日期: 2020年12月23日; 发布日期: 2020年12月30日

## 摘要

随着农业现代化的普及, 农业物联网网络规模迅速扩大, 业务不断扩展, 节点数量急剧增加, 传统的无线通信技术和固定的频谱分配策略已经无法满足大量农业数据的实时传输, 频谱紧缺问题成为制约农业物联网发展的瓶颈问题。认知无线电的出现为解决农业物联网中频谱紧缺的问题提供了有效的解决途径。它可以在不影响主用户正常通信的情况下, 实现动态频谱管理, 充分利用主用户暂时不使用的空闲频段, 从而有效地提高频谱利用率, 解决频谱紧缺的问题。本文首先阐述了农业物联网的概念, 然后介绍了农业物联网中主要的无线通信技术, 分析了农业物联网中的频谱紧缺问题, 最后构建了认知农业物联网, 提出两种认知农业物联网的具体实施构架。本文研究对农业物联网的迅速发展以及用户服务质量的提升具有重要意义。

## 关键词

认知无线电, 农业物联网, 方案设计

# Implementation Architecture Design of Cognitive Agricultural Internet of Things

Wei Liu<sup>1</sup>, Shuang Fu<sup>1\*</sup>, Jinjin Wang<sup>2</sup>, Huanyu Gu<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Institute of Information and Electrical Engineering, Heilongjiang Bayi Agriculture University, Daqing Heilongjiang

<sup>2</sup>Wangyi Youdao Information Technology (Beijing) CO., LTD., Beijing

<sup>3</sup>China Aerospace Science and Technology Corporation, Beijing

Email: \*fushuang\_dq@163.com

Received: Nov. 28<sup>th</sup>, 2020; accepted: Dec. 23<sup>rd</sup>, 2020; published: Dec. 30<sup>th</sup>, 2020

\*通讯作者。

## Abstract

With the popularization of agricultural modernization, the network scale of agricultural Internet of Things is expanding rapidly, the services are expanding continuously, and the number of nodes is increasing rapidly. The traditional wireless communication technology and fixed frequency allocation strategy have been unable to meet the real-time transmission of a huge number of agricultural data. The lack of spectrum has become a bottleneck problem which restricts the development of agricultural Internet of Things. The emergence of cognitive radio provides an effective way to address the issue of lack of spectrum in agricultural Internet of Things. It can achieve dynamic spectrum management without interfering the normal communication of primary users, and takes full advantage of the idle spectrum temporarily which is not used by primary users, so as to effectively improve the spectrum utilization and solve the problem of spectrum shortage. In this paper, we first describe the concept of agricultural Internet of Things. Then, we introduce the major wireless communication technology in agricultural Internet of Things, and analyze the problem of spectrum shortage in agricultural Internet of Things. Finally, we construct cognitive agricultural Internet of Things, and propose two specific implementation frameworks of cognitive agricultural Internet of Things. The research in this paper is of great significance to the rapid development of agricultural Internet of Things and the improvement of user service quality.

## Keywords

Cognitive Radio, Agricultural Internet of Things, Conceptual Design

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

农业是我国经济的基础支撑,而农业发展离不开农业现代化。近年来,随着农业现代化的迅猛发展,农业物联网得到了飞速发展[1]。在农业物联网中,大量感知节点、终端需要将采集的农业信息传送到数据中心,以供农户、农业相关专家参考和分析[2]。然而,随着农业物联网业务和传输数据量的爆炸式增长,利用传统的无线通信技术以及目前固定的频谱资源分配策略已经无法满足农业物联网中海量数据传输的需求,频谱匮乏成为制约农业物联网发展的瓶颈问题[3]。认知无线电(Cognitive Radio, CR)的出现为解决频谱资源紧缺提供了有效途径,它可以在不影响主用户正常通信情况下,通过频谱感知、动态频谱分配以及频谱共享,实现动态频谱分配和管理,从而有效的提高频谱利用率,满足通信要求[4]。认知农业物联网是将认知无线电技术引入到农业物联网中,以解决农业物联网频谱紧缺的问题。

目前现有的研究主要是关于认知物联网的研究。文献[5]分析了目前认知物联网的研究情况和研究趋势。文献[6] [7]分别将 CR 和 Zigbee、UWB 结合,通过仿真证明,在信道存在干扰的情况下,基于认知无线电的物联网能够有效的改善网络通信质量。文献[8]提出一种具有认知功能的物联网感知延伸层频谱共享架构,为认知物联网的发展提供了理论参考。文献[9]提出了认知物联网的基本定义和体系结构,并讨论了认知农业物联网中的安全问题。文献[10]针对认知用户传输对主用户的传输造成干扰的问题,基于干扰控制,研究了认知物联网检测时长的优化问题,提出了认知物联网检测时长的调控方案。文献[11]研究了基于认知物联网传感器网络中的资源分配问题以及基站位置优化问题,提出了一种基于认知无线电的物联网传感

器网络中为基站分配最佳位置和最优信道的方案。文献[12]研究了分簇认知物联网中的感知开销问题,通过联合资源分配提高物联网的传输速率。但以上文献的研究均是关于认知物联网,而没有专门对农业认知物联网的场景进行研究。农业物联网由于地域广阔,业务种类繁多,及突发视频数据流与传统农业信息数据采集传输并存等特点,其无线传输技术及频谱需求情况与普通物联网存在差异。针对认知农业物联网的场景,文献[13]首次讨论了认知无线电在农业物联网中应用的必要性、可能性和合理性,给出简要的认知农业物联网系统结构,但对具体如何实施没有给出具体的方案。文献[14]讨论了认知农业物联网的频谱感知问题,提出一种基于遗传算法的并行合作频谱感知方法。文献[15]将认知无线电技术与农业物联网结合,提出了具有认知功能的农业物联网网络结构,但文献[14][15]均没给出认知农业物联网中认知无线电功能实施的具体方案及位置。综上所述,目前国内外对认知农业物联网的研究仍然较少,对认知农业物联网体系架构方面的研究,仅仅是提出对于认知农业物联网较笼统的方案和框架,缺少详细明确的实施方案,建立认知农业物联网的架构及实施仍需依据各种相关协议、原则,并且需要了解实际农业环境以及终端需求,对架构做进一步的详细划分,从而定义通用框架和功能网络构架、实施方案。

本文将认知无线电与农业物联网结合,考虑农业物联网环境的特殊性,本文首先阐述了农业物联网的概念,然后介绍了农业物联网中主要的无线通信技术,分析了农业物联网中的频谱紧缺问题,最后构建了认知农业物联网,提出两种认知农业物联网的具体实施构架,为解决农业物联网发展中海量数据传输及频谱资源匮乏的问题提供解决有效的方案。

## 2. 农业物联网

农业物联网作为物联网应用的分支之一,随着网络规模和服务类型的不断增加,已经成为物联网发展中不可或缺的部分。农业物联网核心思想是即通过各种仪器仪表实时显示或作为自动控制的参变量参与到自动控制中的物联网[5]。在农业生产环境中,各种数据都需要进行监控和传输,农业物联网即把各种农业基础设施如温度调节器、湿度调节器、光照调节器、摄像头等接入到物联网中,以达到监控生产流程、增加农业产量、改善产品质量、提高经济效益的目的[16]。

农业物联网的架构分为感知层、传输层和应用层[17],如图1所示。在感知层中主要包括各种农业传感器,如温度湿度传感器,对采集到的各种数据进行处理。在传输层主要包括各种传输技术,将感知层得到的数据进行设备间的传输。在应用层主要包括将传输的数据进行相关处理,以用来使相关人员进行分析,并应用到各种农业基础设施中。



Figure 1. Three layer system of agricultural Internet of Things

图 1. 农业物联网三层体系

### 2.1. 感知层

感知层是农业物联网的最底层结构。在感知层中,主要包括在农业环境中各种感知节点。这些感知节点对温湿度、光照强度、CO<sub>2</sub>浓度、图像等农业数据进行采集、分析和处理。由于农业环境中的信息

多为连续的、模拟的，而传感器采集到的数据一般是离散的，因此在感知层需要对获取的数据进行相应的处理，如 A/D 等。

## 2.2. 传输层

传输层作为感知层、应用层连接的桥梁，主要负责将感知层采集到的农业相关数据，通过无线传输至传输基站。常用的传输技术包括建立在 IEEE802.3 基础上的以太网传输技术，建立在 IEEE802.11 基础上的 WiFi 传输技术，建立在 IEEE802.15.1x 基础上的 Bluetooth 传输技术，建立在 IEEE802.15.4 基础上的 ZigBee 传输技术，6LowPAN 传输技术和移动通信中的多种传输技术，如：GSM、GPRS 和 3G 技术，以及建立在 IEEE802.16 基础上的 MiMAX 传输技术等。建立在 802.3 基础上的以太网和建立在 802.11 基础上的 WiFi 都是基于 IP 的网络通信协议，而 IP 协议架构的分层结构也可被其他的通信协议应用，它同样也可以应用于农业物联网的架构中。

## 2.3. 应用层

在应用层，主要是对网络层接收的数据进行处理，将通过算法分析后得到的结果发送至不同的系统，便于终端用户的操作和使用，包括农业生产、管理、经营等活动，如：农作物监控、农产品加工、溯源管理、物流管理、病虫害检测等系统，以提高农作物产量、降低农业生产成本。

## 3. 农业物联网中的无线通信技术

农业物联网中由于地域广、节点分散等特点，使得有线传输技术易受地域和人为的限制，因此农业物联网主要采用无线传输方式。虽然无线传输在稳定性、抗干扰性方面没有有线传输方式的性能好，但其凭借接入方式的多样化，组网、维护、应用的便捷性，可拓展性强以及成本低廉等优点，逐渐发展并日益成熟，已成为农业物联网中主要的传输方式。当前农业物联网可用的无线通信技术主要有：ZigBee、Bluetooth、RFID、WiFi、3G/4G/5G、LTE/LTE-A 等，具体如表 1 所示：

**Table 1.** Wireless communication technologies in agricultural Internet of Things

**表 1.** 农业物联网中的无线通信技术

通信技术	ZigBee	Bluetooth	WiFi	Rfid	UWB	NFC	GPRS/3G/4G	Wimax
频段	868 MHz /915 MHz /2.4 GHz	2.4 GHz	2.4 GHz	-	3.1~10.6 GHz	13.56 MHz	865MHz /2.4GHz	2~66 MHz
传输速率	1 Mbps	11~54 Mbps	1 Kbps	53.3~480 Mbps	424 Kps	424 Kpbs	50~100 kbps/ 200 kps /0.1~1 Gbps	70 Mbps
功耗	低	中	高	低	高	低	中	高
传输距离	0~20 m	0~10 m	0~100 m	1 m	0~10 m	0~20 m	GSM 覆盖区	≤50 km

1) ee: 它具备低功耗、短时延、低成本、大容量等优点。它的传输范围一般小于 100 m，工作时间相对较短，且不传输时可以处在休眠期。在一个 ZigBee 网络中至多可以包含 255 个网络节点，若通过网络协调器，则此网络最多可含有多于 64,000 个网络节点[18]。所以，ZigBee 在农业物联网中应用最广泛。

2) WiFi: 它可以提供 20~100 m 的良好通信范围，覆盖面积相对大，数据传输速率快，在 ISM 频带的 2.4 GHz 频率处的传输速率为 2~54 Mbps。

3) Bluetooth: 具备低功耗、低成本、高安全性的优点, 是一种在 10 m 以内的短距离传输技术, 采用电池供电。Bluetooth 的标准定义使用 ISM 中的 2.4 GHz 频率的个人区域网络通信, 传输速率的范围为 1~24 Mbps。

4) RFID: RFID 分为低频(Low Frequency, LF)、高频(High Frequency, HF)、超高频(Ultra High Frequency, UHF)。主要工作频段为 13.56 MHz、800/900 MHz、2.45 GHz。已在农业的生产、监控、跟踪等方面已广泛使用。

5) GPRS/3G/4G/5G: GPRS 在 2G 系统中可达到 50~100 kbps 的数据传输速率。它缓解了无线设备适用范围的局限性, 在 GSM 覆盖的任意两个设备之间都可以通信, 它更适合在农业环境中的定期监测, 而 3G、4G、5G 的应用可以提供更高的数据传输速率, 应用会更加广泛[19]。

6) WiMAX: 是指全球微波接入互操作性(Worldwide Inter operability for Microwave Access), 数据传输速率为 0.4~1 Gbps, 最远传输距离为 50 km, 移动 WiMAX 的数据传输速率可在 50~100 Mbps [20]。此外, 支持远程、高速通信, 如农业系统远程监控、诊断等。

#### 4. 农业物联网的频谱紧缺问题

随着农业物联网的迅猛发展, 数据通信需求急剧增加。农业物联网业务的多样化以及海量设备的连接和通信, 使得节点数量和通信业务激增, 这对农业物联网中的无线通信技术提出了前所未有的挑战[21]。而如何能够保证大量农业数据传输的实时性和准确性, 也成为农业物联网未来发展中亟待解决的问题[22]。

首先, 在实际的农业环境中, 由于需要传输各类农业数据, 如环境参数、作物生长态势、动物行为等, 对用户终端、传输速率、信道带宽及延时的需求均不相同, 数目庞大的终端设备的连接和多种数据的传输均需要大量的频谱资源支持。

其次, 农业物联网业务流量呈现多样化特性和突发性, 其中既有小流量的数据采集业务, 也包含大量如远程视频监控等占用高带宽的应用。考虑到农业物联网业务的突发特性, 如果大量高带宽应用同时接入网络, 其对频谱资源的需求也是现阶段无线接入技术无法承载的。

此外, 如第 2 节所述, 目前农业物联网所采用的主流无线通信技术, 例如 Zigbee、Bluetooth 等, 大多没有分配固定独享的已授权频段, 而是竞争使用 2.4 GHz 的 ISM (Industrial Scientific Medical) 公用频段, 而该段频谱业务众多, 需不同网络 and 用户竞争使用, 这会导致在有限的频谱资源上造成拥挤和碰撞, 因此无法满足农业物联网巨大的频谱需求[23]。而对于已授权的频谱, 根据美国联邦通信委员会 FCC (Federal Communications Commission) 的调查显示, 目前的已授权频谱资源只有 15%~85% 的利用率, 造成极大的浪费。认知无线电技术的出现, 为如何充分这些利用空闲的频谱资源, 以解决农业物联网频谱紧缺的问题提供了一种有效的途径。

#### 5. 认知农业物联网

认知无线电由 Joseph Mitola 博士于 1999 年提出, 其核心特征是具有对周围的无线环境变化的感知能力、学习能力、自适应能力、可重配置能力等, 以实现任何时间, 任何地点的高可靠性通信以及对网络环境有限的无线频谱资源进行高效利用[24]。认知无线电通过频谱感知发现授权用户的空闲频谱资源, 在不影响授权用户正常通信的前提下, 充分利用授权用户不使用的空闲频谱, 达到充分利用频谱资源, 以满足通信需求的目的。其关键技术包括频谱感知、频谱分配和频谱共享等。

认知农业物联网即将认知技术融入农业物联网中, 首先通过频谱感知技术发现空闲的可用资源, 再利用频谱分配技术分配和充分利用这些频谱资源, 从而扩展农业物联网的可用频谱, 解决其频谱资源紧缺的问题, 满足用户通信需求。

## 6. 认知农业物联网的实施构架

本文根据农业物联网的特点和结构，根据认知无线电与农业物联网结合的层结构不同，提出两种具体的农业物联网实施构架，以解决农业物联网的频谱紧缺问题。

### 6.1. 实施构架一

第一种实施构架是将认知无线电技术的实施放在农业物联网中的传输层进行。具体实施构架如图 2 所示。认知无线电基站设立在农业物联网的汇聚基站中，或单独设立认知无线电基站(简称认知基站)，与农业物联网的汇聚基站相连。各认知用户通过频谱感知，感知授权用户的频谱空闲情况，将感知结果发送到认知基站，由认知基站对各认知用户感知的结果进行融合，并进行最终判决。最后，认知基站将空闲频谱情况发送给农业物联网的汇聚基站。汇聚基站根据可用的频谱资源和各物联网节点的通信需求，合理分配频谱，达到充分利用频谱，满足农业物联网通信需求的目的。

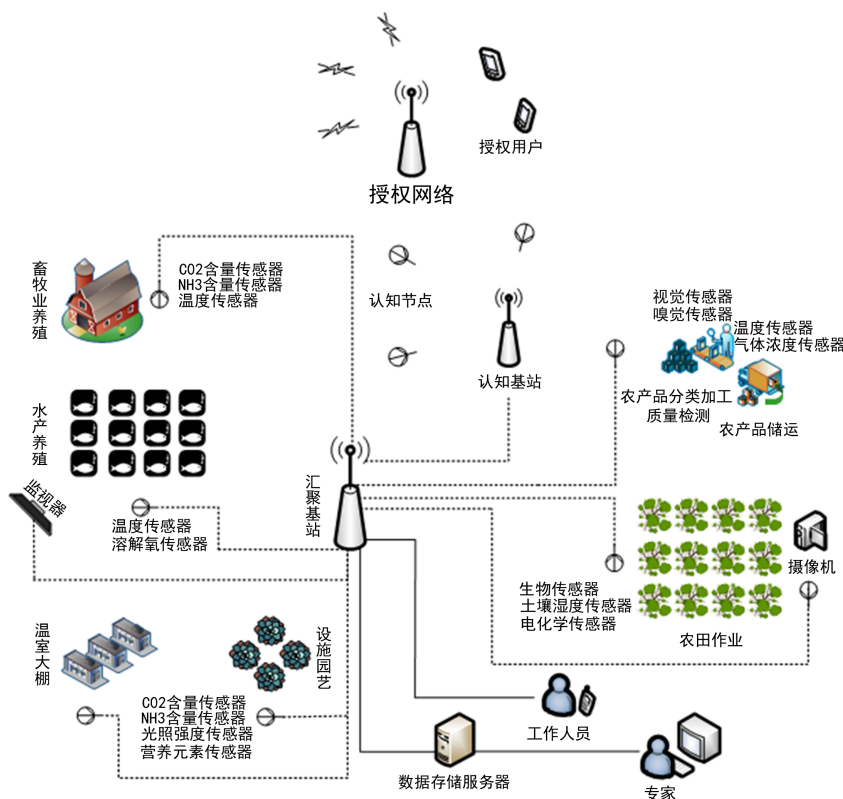


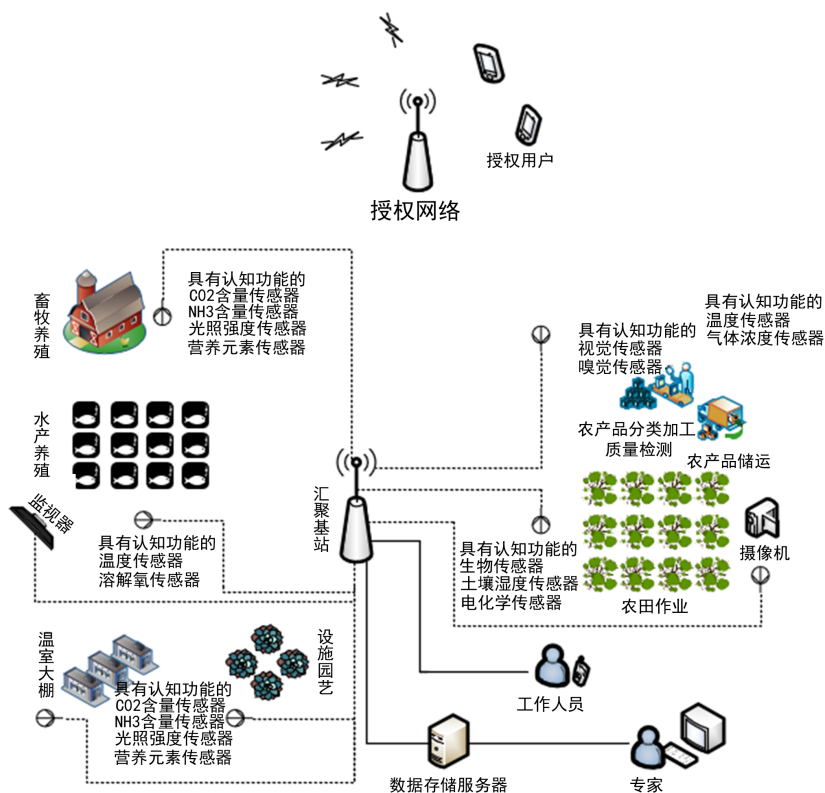
Figure 2. Implementation framework I of cognitive agricultural Internet of Things  
图 2. 认知农业物联网实施架构一

在这种实施构架中，农业物联网的各节点不承担频谱感知的任务，认知无线电基站及认知用户独立于农业物联网的感知节点外，对传统的农业物联网改变较小，仅需额外构建认知基站或在汇聚基站中增加认知无线电功能。因此，易于在现有的农业物联网上进行升级，适用于目前已构建的农业物联网。

### 6.2. 实施构架二

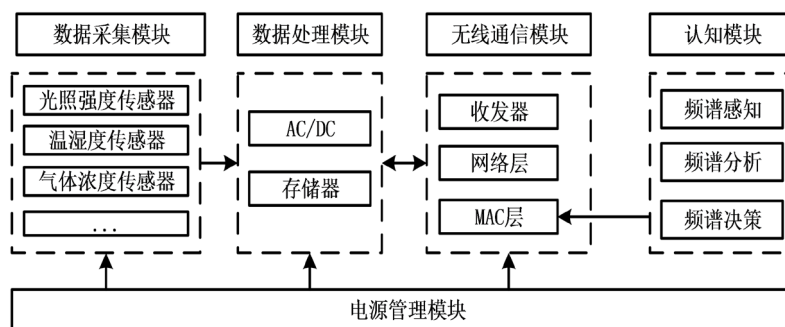
第二种实施构架是将认知无线电技术与农业物联网中的感知层进行结合，即从终端感知设备的角度出发。具体实施构架如图 3 所示。在该方案中，需要为农业物联网中的感知节点配备认知无线电功能，使物

联网节点能够动态的感知周围频谱的使用情况，并将感知结果汇报给汇聚基站。汇聚基站同样配备认知无线电功能，它将各节点感知的结果进行汇总并进行决策，得到最终的频谱可用情况，然后，再结合节点的通信需求，地理位置，以及所在处的频谱情况，合理地动态地分配可用频谱资源，以满足通信需求。



**Figure 3.** Implementation framework II of cognitive agricultural Internet of Things  
**图 3.** 认知农业物联网实施架构二

具有认知无线电功能的农业物联网设备结构如图 4 所示。它包括数据采集块、数据处理模块、无线通信模块、认知无线模块和电源模块。其中无线数据采集块、数据处理模块、无线通信模块与传统的农业物联网节点类似，认知无线模块中包括频谱感知、频谱分析和频谱决策部分。其中，在认知物联网感知节点中，仅包含频谱感知模块，而在汇聚中心中包含频谱分析和频谱决策模块，以进行频谱的分析和最后决策。



**Figure 4.** Equipment structure of cognitive agricultural Internet of Things with cognitive function  
**图 4.** 具有认知功能的认知农业物联网设备结构

在这种实施构架中, 农业物联网的各节点需要承担频谱感知的任务, 因此需要对农业物联网节点进行升级, 使其配备频谱感知功能, 这在一定程度上也增加了节点的成本和能耗。但优点是无需增加额外的认知节点进行频谱感知, 而且感知的频谱使用情况为所在节点处的频谱使用情况, 因此在后续的频谱分配中能够获得更优的频谱分配方案。由于该方案需要采用配备认知功能的物联网节点和汇聚基站, 因此, 该方案适用于新构建的农业物联网, 以及对物联网节点成本有一定宽裕度的场景。

## 7. 结论

本文针对由农业物联网网络规模、业务和通信需求迅速增长导致频谱资源紧缺的瓶颈问题, 首先阐述了农业物联网的概念和结构, 然后介绍了农业物联网中主要的无线通信技术, 分析了农业物联网中的频谱紧缺问题, 最后将认知无线电和农业物联网相结合, 构建了认知农业物联网, 并提出两种认知农业物联网的具体实施构架, 使农业物联网能够感知并充分利用空闲的频谱资源, 解决农业物联网发展中频谱资源紧缺的瓶颈问题。其研究成果对农业物联网的迅速发展以及用户服务质量的提升具有重要意义。

## 基金项目

本文研究受到黑龙江省自然科学基金优秀青年项目(NO.YQ2019F014)、国家留学基金、黑龙江八一农垦大学青年创新人才培养计划(ZRCQC201807)和黑龙江八一农垦大学博士科研启动基金(XDB2015-28)的支持。

## 参考文献

- [1] Pachayappan, M., Ganeshkumar, C. and Sugundan, N. (2020) Technological Implication and Its Impact in Agricultural Sector: An IoT Based Collaboration Framework. *Procedia Computer Science*, **171**, 1166-1173. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.04.125>
- [2] 王威, 米合日阿依·阿卜力克木, 彭步迅. 物联网技术在农业中的应用[J]. 现代农业科技, 2020(22): 245-246.
- [3] 韩志斌, 韩基龙, 张娜. 物联网技术在传统农业应用中存在的问题及对策[J]. 农村经济与科技, 2017, 28(13): 49-50.
- [4] Haykin, S. (2005) Cognitive Radio: Brain-Empowered Wireless Communications. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, **23**, 201-220. <https://doi.org/10.1109/JSAC.2004.839380>
- [5] 费鹏飞. 认知物联网关键技术国际态势分析[J]. 高科技与产业化, 2020(2): 49-55.
- [6] 金丽萍, 蒋挺, 周正. 认知无线电在 Zigbee 技术中的应用研究[J]. 无线电工程, 2008(4): 46-48+51.
- [7] 徐小涛, 邓春, 张昆, 田铖. 认知无线电在 UWB 中的应用[J]. 数据通信, 2009(1): 27-30.
- [8] 姚海鹏, 张智江, 刘韵洁. 异构架构下物联网频谱规划研究[J]. 电信技术, 2012(5): 81-85.
- [9] 郎为民, 杨德鹏, 李虎生. 认知物联网频谱感知数据伪造攻击研究[J]. 信息安全, 2011(10): 1-3.
- [10] 刘鑫一, 姜建. 基于干扰控制的认知物联网检测时长优化[J]. 中国科技论文, 2017, 12(2): 130-134.
- [11] 文槿奕. 基于认知无线电的 IoT 传感器网络资源分配算法研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆邮电大学, 2018.
- [12] 刘鑫. 分簇认知物联网联合资源分配算法[J]. 物联网学报, 2019, 3(1): 14-19.
- [13] 丁么明, 夏洪星. 认知无线电在农业物联网中的应用[J]. 数学的实践与认识, 2013, 43(3): 103-110.
- [14] 富爽, 杜红, 许杰, 李爱传. 农业物联网中基于遗传算法的并行合作频谱感知[J]. 农业工程技术, 2015(36): 48-53.
- [15] 杜红, 富爽, 许杰, 初洪娜. 基于认知无线电的农业物联网架构的研究[J]. 电视技术, 2015, 39(20): 31-34.
- [16] 许梦莹. 关于大数据的智慧农业物联网系统研究[J]. 电子世界, 2020(12): 68-69.
- [17] 周鹏, 田维平. 农业物联网分层结构设计[J]. 计算机时代, 2018(9): 17-20.
- [18] 纪丽猛. 基于 ZigBee 技术的无线数据采集系统研究与设计[D]: [硕士学位论文]. 秦皇岛: 燕山大学, 2013.
- [19] Meeravali, K., Gopikrishna, A., Rasool, S.N., et al. (2020) Tipping Bucket Rain Gauge with GPRS Data Logger



- 
- DL-2016: Specifications, Installation, and Analysis. *Materials Today: Proceedings*, **27**, 1394-1400. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.769>
- [20] Sarkar, T., Ghosh, A., Chakraborty, S., *et al.* (2020) Employment of Mixed Mode in Single-Layer Microstrip Antenna for ISM/WiMAX/WLAN/4G/Sub 6 GHz 5G Mobile Communication. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, **34**, 1-19. <https://doi.org/10.1080/09205071.2020.1759463>
- [21] 张颖楣. 物联网精准农业发展问题及对策[J]. 南方农机, 2020, 51(2): 81+88.
- [22] 冯新新, 梁张华. 当前我国农业物联网发展存在的问题及建议[J]. 通信管理与技术, 2018(5): 12-14.
- [23] Kulpa, K., Weinmann, F., Boria, V.E., *et al.* (2019) Low Loss, Fully-Printed, Ferroelectric Varactors for High-Power Impedance Matching at Low ISM Band Frequency. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, **11**, 658-665. <https://doi.org/10.1017/S1759078719000643>
- [24] Mitola III, J. and Maguire Jr., G.Q. (1999) Cognitive Radio: Making Software Radios More Personal. *IEEE Personal Communications*, **6**, 13-18. <https://doi.org/10.1109/98.788210>