

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.03.018

# 基于低功耗的发射功率自适应水稻田 WSN 监测系统

王卫星<sup>1,2</sup> 陈华强<sup>1</sup> 姜晟<sup>1,3</sup> 铁风莲<sup>1</sup> 孙宝霞<sup>1</sup> 余杰平<sup>1</sup>

(1. 华南农业大学电子工程学院, 广州 510642; 2. 广东省农情信息监测工程技术研究中心, 广州 510642;

3. 广东省智慧果园科技创新中心, 广州 510642)

**摘要:** 针对农田环境信息监测存在能量有限、节点通信距离各异等特点,设计了一种基于接收信号强度和丢包率的发射功率自适应水稻田监测系统,并搭建了一个长期、稳定且可靠的低功耗无线传感网络。硬件方面,为扩大网络的覆盖范围和提高系统的稳定性,采用频率异构的方式对节点分簇,为不同类型的节点配置不同类型的天线。软件方面,为提高 CPU 利用率,各类节点程序设计采用基于小型嵌入式实时操作系统 FreeRTOS;为降低功耗,采取定时休眠唤醒、传感器掉电控制的工作模式和基于感知数据差的低功耗自适应机制。试验结果表明,在 150 m 通信距离内,系统可以根据当前的通信质量,将节点的发射功率自适应地调整到实现当前通信可靠性所要求(丢包率小于 1.3%)的最小发射功率上;对比 10 dBm 固定发射功率,当发射功率自适应算法调整为 8、6、3 dBm 时,节点续航能力分别提升了 11.9%、21.4% 和 33.3%。通讯性能对比表明,本设计节点的通讯性能明显优于其他 3 种基于不同发射功率自适应算法的节点,从而验证了本系统的可靠性与实用性。

**关键词:** 水稻田; 监测系统; 无线传感网络; 发射功率自适应; 低功耗

**中图分类号:** TN925+.93; S126 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)03-0150-08

## WSN Monitoring System with Adaptive Transmitting Power Based on Low-power-consumption in Rice Fields

WANG Weixing<sup>1,2</sup> CHEN Huaqiang<sup>1</sup> JIANG Sheng<sup>1,3</sup> TIE Fenglian<sup>1</sup> SUN Baoxia<sup>1</sup> YU Jieping<sup>1</sup>

(1. College of Electronic Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

2. Guangdong Engineering Research Center for Monitoring Agricultural Information, Guangzhou 510642, China

3. Guangdong Modern Agricultural Science and Technology Innovation Center for Intelligent Orchard, Guangzhou 510642, China)

**Abstract:** To solve the problems occurring in surveying the farmland environment such as limited energy and different distances of communication among the nodes, a monitoring system with adaptive transmitting power for rice fields based on received signal strength indication (RSSI) and packet loss rate (PLR) was designed and a long-time, stable and highly reliable wireless sensor network (WSN) running this algorithm with low power consumption was established. In the aspect of hardware, to extend the network coverage and improve the stability of the system, the method of frequency heterogeneity was adopted to cluster the nodes and configure different antennas for different nodes. In the aspect of software, the mini embedded free real-time operating system (FreeRTOS) was selected to improve the utilization of CPU and prolong the working life of the clusters. Additionally, to reduce the power consumption, the mode of timed sleeping and waking as well as the power-down control of sensor were selected as the working pattern and the adaptive low-power-consumption mechanism were used on the basis of data deviation perception. The result of tests showed that the system can adaptively adjust the transmitting power to the minimum value which can meet the demand of the stability of communication (PLR was less than 1.3%) within the communication distance of 150 m according to the quality of current communication. In this situation, when the algorithms of adaptive transmitting power was adjusted to 8 dBm, 6 dBm and 3 dBm, respectively, from 10 dBm, the battery duration of nodes was increased by 11.9%, 21.4% and 33.3%. As the result revealed, the communication performance of the nodes was significantly better than those of three other nodes with different adaptive transmission power algorithms. Thus it can be seen that the

收稿日期: 2017-11-06 修回日期: 2018-01-05

基金项目: 广东省自然科学基金项目(2014A030313451)和广州市科技计划项目(201605030013)

作者简介: 王卫星(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事电子信息技术在农业中的应用研究, E-mail: weixing@scau.edu.cn

system was highly stable and practical in the application of WSN for the monitoring of farmland environment.

**Key words:** rice field; monitoring system; wireless sensor network; adaptive transmitting power; low power consumption

## 0 引言

无线传感器网络(Wireless sensor network, WSN)凭借自身的优势,通过在监测区域内部署大量低成本的无线传感节点自组网协同工作,从而实现远程信息感知和传输。

无线传感器网络应用到水稻田环境信息采集中,可推动农业生产的信息化和智能化,目前国内外有大量基于无线传感器网络的研究<sup>[1-6]</sup>,尤其以作物信息采集为基础的精准农业方面得到了广泛的应用<sup>[7-15]</sup>。

WSN 节点的能量<sup>[16-17]</sup>成为限制其实际应用的最主要原因,由于节点一般采用电池供电,因此在设计上必须要求是低功耗的。研究发现 WSN 节点的能量大部分被无线射频模块<sup>[18]</sup>所消耗。WSN 节点在无线通信时,不可避免地受到通信距离<sup>[19]</sup>、遮挡物的限制、电磁干扰以及监测环境的影响造成信号衰减<sup>[20-21]</sup>导致丢包现象。当发射功率过高时将造成能量的浪费,而发射功率过低时又将影响通信的可靠性。因此,在可靠通信的前提下,降低发射功率<sup>[22-23]</sup>的节能方式为本文研究目标。

ZHAO 等<sup>[24]</sup>根据路径损耗指数和能量控制系数提出分布式自适应传输功率分配策略(LA-TPA),该策略可有效地构建一个高性能网络拓扑结构,但仅停留在仿真阶段。王慧娇等<sup>[25]</sup>针对无线传感器网络节点能量有限与能耗不均衡导致网络生命周期提前结束的问题,提出了一种能耗均衡的自适应拓扑博弈算法(ATCG),该算法根据节点平均寿命调整自身的功率,帮助最短寿命节点降低功率,延长整个网络的生存时间,但仅停留在仿真阶段。邵奇可等<sup>[26]</sup>提出了一种面向 WSN 的自适应模糊功率控制算法 DAFPC,能根据接收到的链路质量参数信息自适应地调整控制器,快速地调节发射功率,但仅停留在仿真阶段。贾燕燕等<sup>[27]</sup>提出了一种基于神经网络自适应网络功率机制来动态调整无线体域网中传感器节点的发射功率控制方法。CORREIA 等<sup>[28]</sup>提出了一种基于发射功率、接收功率和背景噪声的无线节点发射功率混合设置方法降低射频功耗。徐强等<sup>[29]</sup>为降低节点发射功率,设计基于全局信息的功率控制算法 GDTPC 和基于局部信息的功率控制算法 LDTPC,但该算法仅停留在算法理论分

析阶段。王沁等<sup>[30]</sup>从试验的角度,提出了一种基于丢包率来描述链路可靠性的工业环境统计模型。黄庭培等<sup>[31]</sup>从试验的角度,通过信号接收强度(Received signal strength indication, RSSI)对链路通信质量进行评价,表明对于周围动态变化的收发环境,RSSI 能够很好地用于链路通信质量评价。李小敏等<sup>[32]</sup>根据水稻生长过程环境因素变化,提出了根据水稻生长周期、通信距离、接收信号强度、平均丢包率等因素自动调整节点发射功率的能量自适应功耗调整机制。但该机制监测对象局限于水稻分蘖和抽穗 2 个生长时期,最大通信距离仅为 60 m,且信号接收灵敏度仅为 -90 dBm。徐立鸿等<sup>[33]</sup>根据温室设施和作物的影响,通过丢包率和接收信号强度对节点间通信可靠性进行评价,提出 WSN 节点发射功率自适应控制算法。但该算法局限于温室应用,最大通信距离仅为 40 m,且信号接收灵敏度仅为 -58 dBm。石繁荣等<sup>[34]</sup>设计了自适应 Tree-Mesh 结构的大棚无线监测网络,提出基于接收信号强度指示的最佳发射功率自适应机制和基于感知数据差值的最小传输数据冗余自适应机制,但该机制仅停留在仿真阶段,且干电池供电情况下通信距离仅为 30 m。

针对节点间的通信质量受通信距离影响,且电磁波在传输过程中随着通信距离越远,衰减越大,当接收方信号强度低于门限阈值时就会出现丢包的情况,本文从试验角度,在 WSN 节点能量有限、通信距离各异、监测环境干扰大的情况下,提出一种基于 RSSI 和丢包率的发射功率自适应控制算法。并为进一步降低 WSN 节点的功耗,设计基于感知数据差的低功耗自适应机制,并在水稻田间进行验证试验。

## 1 基础试验

为研究水稻田中通信距离对节点间通信质量的影响,进行接收信号强度和丢包率试验。试验采用亿佰特公司推出的 433MHz 频段的 E41-T10S2 射频模块来搭建无线传感器网络。该模块发射功率最大 10 dBm、4 级可调发射功率(10、8、6、3 dBm)。网关节点每次收到数据包时,获取接收信号强度,即 RSSI,同时统计丢包率。为统计丢包率,在采集节点数据帧中用一个整型序列记录发包个数。网关节点收到该数据包后处理对应序列数据,如出现跳跃现象,则视为丢包。假设丢包累计为  $L$ ,将最近一次收

到的序列数值认为是总发包数设为  $N$ , 则该采集节点的丢包率  $P_{LR}$  为

$$P_{LR} = \frac{L}{N} \times 100\% \quad (1)$$

试验 1: RSSI 对丢包率的影响。试验在  $300 \text{ m} \times 300 \text{ m}$  的水稻田中进行, 采集节点和网关节点距离地面均为  $1.5 \text{ m}$ 。采集节点以距离网关节点  $20 \text{ m}$  为间隔, 配置发射功率为  $10 \text{ dBm}$ , 发包间隔为  $200 \text{ ms}$ 。每次试验均发送  $500$  个数据包, 共进行了  $12$  次试验。采集节点数据发送完毕后, 网关节点通过上位机软件记录 RSSI 的算术平均值, 并统计丢包率。试验结果如图 1 所示。

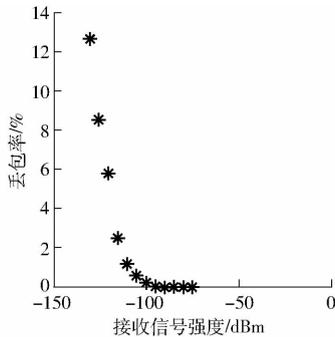


图 1 RSSI 对丢包率的影响

Fig. 1 Effect of received signal strength indication on packet loss rate

试验 2: 通信距离和发射功率对丢包率的影响。试验在  $300 \text{ m} \times 300 \text{ m}$  的水稻田中进行, 采集节点和网关节点距离地面均为  $1.5 \text{ m}$ 。采集节点以距离网关节点  $40 \text{ m}$  为间隔, 依次配置发射功率为  $3, 6, 8, 10 \text{ dBm}$ , 发包间隔为  $200 \text{ ms}$ 。每次试验均发送  $500$  个数据包, 共进行  $20$  次试验。采集节点数据发送完毕后, 网关节点通过上位机软件统计丢包率, 试验结果如图 2 所示。

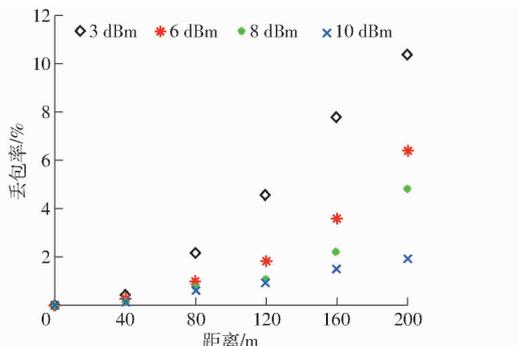


图 2 通信距离和发射功率对丢包率的影响

Fig. 2 Effect of distance and transmitting power on packet loss rate

由图 1 可知, 随着接收信号强度变小, 丢包率逐渐增大, 且当 RSSI 大于  $-108 \text{ dBm}$  时, 丢包率低于  $1.3\%$ 。由图 2 可知, 当发射功率固定时, 随着通信距离增大, 丢包率随之增大。当通信距离固定时, 发

射功率越大, 丢包率越小。由此可知, 通过增大发射功率, 可以降低丢包率, 在可接受的丢包范围内, 通过降低发射功率可以节约能耗。

## 2 节点低功耗自适应设计

针对节点大部分能量被无线模块所消耗, 且采集节点按照固定的采集周期上报监测数据存在能量浪费的不合理之处。为降低节点功耗, 设计了节点发射功率自适应算法和基于感知数据差的低功耗自适应机制。

### 2.1 节点发射功率自适应算法设计

由试验 1 和试验 2 可知, RSSI、发射功率、通信距离对通信质量有直接影响。实际应用中节点部署在监测区域内的位置不一, 当所有节点均采用最大发射功率工作时, 势必会造成能量的浪费。发射功率的调整, 将直接影响节点间通信距离、信号接收强度和丢包率。因此设计一种基于通信距离、信号接收强度和丢包率的节点发射功率自适应算法, 具体如下:

根据文献 [19], 无线信号通信的发射功率、接收功率和通信距离的关系为

$$P_R = P_T / d^n \quad (2)$$

式中  $P_R$ ——信号接收功率,  $\text{mW}$

$P_T$ ——信号发射功率,  $\text{mW}$

$d$ ——收发节点间的通信距离,  $\text{m}$

$n$ ——环境传播因子

式(2)两边取对数乘以 10, 单位换算为  $\text{dBm}$ , 可得

$$P_T - P_R = 10n \lg d \quad (3)$$

式中  $P_R$ ——接收信号强度,  $\text{dBm}$

$P_T$ ——信号传输  $1 \text{ m}$  时接收信号强度,  $\text{dBm}$

由式(3)可以看出,  $P_T$  和  $n$  的数值决定了接收信号强度  $P_R$  和通信距离  $d$ 。鉴于监测系统中网关节点与采集节点间的相互数据通信, 设采集节点发射功率为  $P_{NT}$  ( $\text{dBm}$ ), 接收信号强度为  $R_{SSI}$ ; 网关节点发射功率为  $P'_{GT}$  ( $\text{dBm}$ ); 网关节点接收信号强度为  $R'_{SSI}$ 。由式(3)可得

$$P_{NT} - R'_{SSI} = P'_{GT} - R_{SSI} \quad (4)$$

由于采集节点采集数据后传输到网关节点, 由图 1 可知当网关节点的接收功率即 RSSI 控制大于  $-108 \text{ dBm}$  时, 丢包率低于  $1.3\%$ , 则采集节点的发射功率可表示为

$$P_{NT} = P'_{GT} - R_{SSI} - 108 \quad (5)$$

由式(5)可知, 当网关节点发射功率为  $P'_{GT}$  不变时, 采集节点发射功率  $P_{NT}$  可根据  $R_{SSI}$  调整。当  $R_{SSI}$  较小时, 通过增大  $P_{NT}$  来提高网络的可靠性; 当  $R_{SSI}$  较大时, 通过减小  $P_{NT}$  来节省系统的能量。

根据文献[32]可知,水稻的株高和叶面积在未到达最大值前,其与水稻生长天数呈线性关系,且田间节点间的遮挡是动态变化的,因而丢包率必定会受到环境影响,根据丢包率情况来修正调整发射功率,即

$$P = P_0 + M\Delta P \quad (6)$$

式中  $P$ ——实际发射功率, dBm

$P_0$ ——初次组网时根据式(5)调整而得功率

$\Delta P$ ——发射功率增量基数,取值为 1

$M$ ——功率修正系数

设  $E_{PLR}$  为当前实际丢包率与参考丢包率之差, 设  $D_{PLR}$  为当前实际丢包率与上次丢包率之差。修正系数  $M$  根据  $-0.5 \leq E_{PLR} \leq 0.5$ 、 $E_{PLR} > 0.5$  和  $E_{PLR} < -0.5$ 、 $-0.5 \leq D_{PLR} \leq 0.5$ 、 $D_{PLR} > 0.5$  和  $D_{PLR} < -0.5$ , 组合 9 种可能出现的情况, 调整规则如表 1 所示。

表 1 修正系数  $M$  调整规则

Tab. 1 Rules of adjustment of correction factor  $M$

	$-0.5 \leq D_{PLR} \leq 0.5$	$D_{PLR} > 0.5$	$D_{PLR} < -0.5$
$-0.5 \leq E_{PLR} \leq 0.5$	不变	+1	-1
$E_{PLR} > 0.5$	+1	+2	不变
$E_{PLR} < -0.5$	-1	不变	-2

以  $E_{PLR} > 0.5, D_{PLR} > 0.5$  的情况举例说明,  $E_{PLR} > 0.5$  反映当前丢包率已超过参考丢包率,  $D_{PLR} > 0.5$  反映丢包率的趋势在增长。因此可看出单纯由 RSSI 控制发射功率已不能满足需求, 将修正系数  $M$  值加 2。根据式(6), 节点将以更大的发射功率工作, 降低丢包率。

### 2.2 基于感知数据差的低功耗自适应机制

为了避免节点不必要的数据发送, 另外设计了一种基于感知数据差的低功耗自适应机制, 指导节点该轮监测数据是否上报, 从而进一步降低节点功耗。该机制包括以下定义

$$V = \begin{cases} V_0 & (i=0) \\ V & (|V_i - V| < M_{vef}, i \in 1, 2, \dots, n) \\ V_i & (|V_i - V| \geq M_{vef}, i \in 1, 2, \dots, n) \end{cases}$$

$$K = \begin{cases} 1 & (V = V_0) \\ 0 & (|V_i - V| < M_{vef}, i \in 1, 2, \dots, n) \\ 1 & (|V_i - V| \geq M_{vef}, i \in 1, 2, \dots, n) \end{cases}$$

式中  $V$ ——上报的监测数据

$V_i$ ——第  $i$  次监测的数据

$M_{vef}$ ——某监测指标数据设定的当前值与上轮上报数值间允许差值范围

$K$ ——上报数据标志, 当  $K=0$  时数据丢弃, 当  $K=1$  时, 上报  $V$  值

## 3 监测系统软硬件设计

本监测系统主要由采集节点、簇头节点、网关节点以及远程数据监测中心组成, 监测系统网络结构如图 3 所示。系统采用频率异构的分簇方式, 簇内单跳, 簇间多跳的路由协议组网, 可避免不同簇间节点的数据碰撞。簇头节点将簇内数据融合后发送至网关节点, 网关节点通过 GPRS 网络上传数据至远程监测中心。

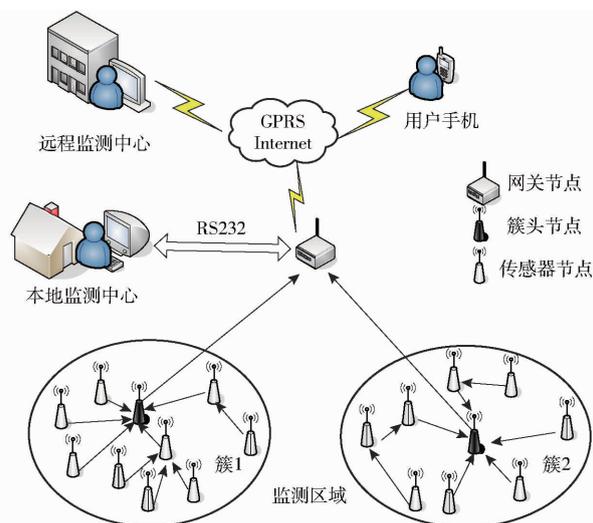


图 3 监测系统网络结构

Fig. 3 Network structure of monitoring system

### 3.1 系统硬件设计

针对系统对低功耗的要求, 系统内节点均采用低功耗 STM32F103 系列芯片作为主处理器, 待机时功耗为 22  $\mu$ A。针对传感器和 GPRS 等外设功耗较大的情况, 设计了供电可控的低功耗电路。鉴于定向天线<sup>[35-36]</sup>相对全向天线具有方向性且增益高, 本系统采用混合天线<sup>[37]</sup>的组网方式。

#### 3.1.1 混合天线

在无线传感器网络应用中, 全向天线具有 360° 的水平辐射能力, 通常应用在一对多的通信场景。而定向天线在一定方向上能量集中, 且增益高于全向天线, 抗干扰能力相对强, 通常适用于点对点的远距离通信。鉴于系统各类节点的工作职能、部署位置、通信距离和方向性要求考虑, 采集节点和网关节点配备全向天线, 簇头节点配备定向天线实现基于混合天线的无线传感组网。

#### 3.1.2 采集节点硬件设计

采集节点负责采集监测环境内生产相关信息。主要由微处理器、电源模块、传感器、射频模块以及接受强度检测模块组成。为降低节点功耗, 传感器采用可控的供电方式。设计以光耦合器、PMOS 管为主的控制电路, 该电路截止时功耗为 100 nA。

### 3.1.3 簇头节点的硬件设计

簇头节点负责融合簇内节点数据后发送至网关节点。主要由微处理器、电源模块、射频模块、太阳能充电管理模块和定向天线组成。由于能量消耗相对大,因此设计搭载太阳能板,通过充电管理模块对锂电池进行充电管理,以延长簇头节点的使用寿命。

### 3.1.4 网关节点硬件设计

网关节点负责接收各簇头节点的数据包,融合处理后上传至远程监测中心。主要由微处理器、电源模块、存储模块、射频模块、接受强度检测模块、太阳能充电管理模块和 GPRS 模块组成。由于能量消耗相对大,因此也设计搭载太阳能板,以延长网关节点的使用寿命。

## 3.2 系统软件设计

为满足节点发射功率自适应算法和基于感知数

数据包标志码	簇号	节点号	传感器 1	传感器 2	传感器 3	节点电源电压	发包数	发射功率	接收信号强度	跳板数	数据包 CRC
--------	----	-----	-------	-------	-------	--------	-----	------	--------	-----	---------

图4 采集节点的数据帧结构

Fig. 4 Data packet structure used in collect node

反馈包标志码	簇号	节点号	接收信号强度	丢包率	跳板数	数据包 CRC
--------	----	-----	--------	-----	-----	---------

图5 网关节点反馈帧结构

Fig. 5 Feedback packet structure used in gateway node

### 3.2.2 软件上低功耗设计

为延长节点的使用寿命,软件上各类节点均基于多任务实时嵌入式操作系统 FreeRTOS,可提高 CPU 利用率,减少在线时间。同时应用程序上采用定时休眠唤醒的工作机制以及传感器掉电控制来进一步降低功耗。

## 4 田间组网试验与结果分析

采用本文设计的发射功率自适应算法与相关节能机制,利用 8 个采集节点、2 个簇头节点和 1 个网关节点,在 300 m × 300 m 的水稻田搭建无线传感器网络进行组网试验。通过测试丢包率和电池续航时间,验证本文算法的可靠性。现场部分设备如图 6、7 所示。

### 4.1 系统可靠性评价

通过远程服务器统计丢包率,结果如表 2 所示。由表 2 可知,基于本算法可以自适应地调整发射功率,节点自动选择了能够满足当前通信可靠性所要求(本文设定为丢包率不超过 1.3%)的最小发射功率。

### 4.2 节点放电特性

节点放电特性是衡量一个系统稳定可靠的标准之一。在无太阳能充电条件下,对节点寿命性能进

据差的低功耗自适应机制的设计所需,设计了针对性的采集节点数据帧和网关节点反馈帧。同时为进一步降低功耗,应用程序基于低功耗的实时嵌入式系统开发。

### 3.2.1 路由协议及数据帧

本系统采用频率异构的分簇方式,簇内单跳,簇间多跳的路由协议组网。簇头节点接收到新的数据包,先检查自身的节点转发登记表,若已转发过,则不再转发。可避免簇头多次转发相同数据包而造成能量浪费。采集节点的数据帧结构如图 4 所示。其中数据帧中的发包数序列用于网关节点统计丢包率,发射功率和接收信号强度用于指示当时采集节点的发射功率和信号强度信息。网关节点反馈帧结构如图 5 所示,用于反馈某节点的信号强度以及丢包率,作为该节点发射功率自适应调节的依据。



图6 配置定向天线的簇头节点

Fig. 6 Cluster head node with a directional antenna



图7 配置全向天线的网关节点

Fig. 7 Gateway node with an omnidirectional antenna

表2 节点发射功率自适应算法可靠性测试结果

Tab.2 Test results of reliability of adaptive transmitting power control algorithm for nodes

距离网关节点/m	功率设置	发射功率/dBm	丢包率/%
40	默认设置	3	0.4
	默认设置	6	0
	默认设置	8	0
	默认设置	10	0
	自适应设置	3	0.5
70	默认设置	3	1.8
	默认设置	6	0.9
	默认设置	8	0.7
	默认设置	10	0.4
	自适应设置	6	0.8
100	默认设置	3	3.8
	默认设置	6	1.6
	默认设置	8	0.9
	默认设置	10	0.7
	自适应设置	8	0.9
150	默认设置	3	7.2
	默认设置	6	3.2
	默认设置	8	2.0
	默认设置	10	1.2
	自适应设置	10	1.3

进行测试。当电池电压降至 10 V, 锂电池将停止输出, 节点寿命结束。试验对象为 2 组节点, 一组采用固定发射功率 10 dBm, 另一组则运用发射功率自适应算法。两组节点均采用 12 V, 10 A·h 锂电池, 部署位置一样, 高度 1.5 m, 设置节点每 2 min 完成一轮唤醒、数据采集发送、数据接收转发、待机等周期性工作。图 8 为试验节点的电池放电特性对比。可见, 对比 10 dBm 固定发射功率, 当发射功率自适应算法调整为 8、6、3 dBm 时, 节点电池的续航能力分别提升了 11.9%、21.4% 和 33.3%。

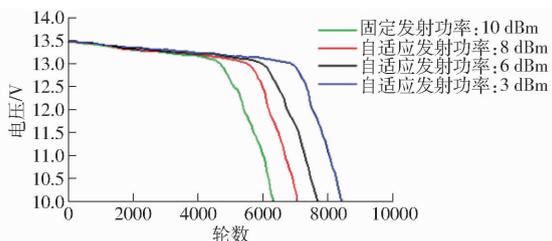


图8 节点电池放电特性

Fig.8 Discharge characteristics of battery

### 4.3 节点通讯性能

节点在 300 m × 300 m 的水稻田进行测试, 节点

搭载 433M 的 E41 - T10S2 射频模块, 天线高度 1.5 m。表 3 为 4 种节点基于不同发射功率自适应算法状态下的通讯性能比较。

表3 节点性能比较

Tab.3 Comparison of performances of different node products

节点	通信距离/ m	接收灵敏 度/dBm	丢包率/ %	频段/ Hz
本文节点	150	-108	1.3	$4.33 \times 10^8$
A	60	-90	3.0	$4.33 \times 10^8$
B	40	-58	1.0	$2.40 \times 10^9$
C	30		1.0	$2.40 \times 10^9$

注: A、B、C 节点分别对应李小敏等<sup>[32]</sup>、徐立鸿等<sup>[33]</sup>和石繁荣等<sup>[34]</sup>设计的发射功率自适应节点。

由表 3 知: 本文节点的有效通信距离、接收灵敏度、通信质量明显优于其他 3 种节点。在保证通信畅通且造价不高前提下, 本文节点能以最优节点数进行 WSN 组网。由此可见, 本文节点在水稻田环境监测组建无线传感器网络的应用中更具实用性以及针对性。

### 5 结束语

针对农田环境信息监测存在能量有限、节点通信距离各异等特点, 设计了一种基于接收信号强度和丢包率的发射功率自适应水稻田监测系统, 为进一步降低功耗, 设计了基于感知数据差的低功耗自适应机制。并搭建了一个长期、稳定且可靠的低功耗无线传感网络, 开展了通信可靠性和低功耗这两个无线传感网关键技术研究, 并在水稻田进行了试验验证。试验结果表明, 在 150 m 的通信距离内, 根据 RSSI 值 (大于 -108 dBm) 和丢包率情况可以自适应地调整发射功率, 节点自动选择了能够满足当前通信可靠性所要求 (本文设定为丢包率不超过 1.3%) 的最小发射功率上; 对比 10 dBm 固定发射功率, 当发射功率自适应算法调整为 8、6、3 dBm 时, 节点电池的续航能力分别提升了 11.9%、21.4% 和 33.3%。结果表明, 本文节点的有效通信距离、接收灵敏度、通信质量明显优于其他 3 种节点, 在保证通信畅通且造价不高前提下, 本研究能以更优节点数进行 WSN 组网, 尤其适用于大面积水稻田环境监测。

### 参 考 文 献

- LI B, WANG W, YIN Q, et al. An energy-efficient geographic routing based on cooperative transmission in wireless sensor networks[J]. Science China Information Sciences, 2013, 56(7): 1-10.
- TAVARE J, VELEZ F, FERRO J. Application of wireless sensor networks to automobiles[J]. Measurement Science Review, 2008, 8(3): 65-70.

- 3 COLLOTTA M, PAU G, SCATA G, et al. A dynamic traffic light management system based on wireless sensor networks for the reduction of the red-light running phenomenon[J]. *Transport and Telecommunication*, 2014, 15(1): 1-11.
- 4 PEREIRA L A M, PINTO C N, PIZA L V, et al. A new alternative real-time method to monitoring dough behavior during processing using wireless sensor technology[J]. *International Journal of Food Engineering*, 2013, 9(4): 505-509.
- 5 MILENKOVIC A, OTTO C, JOVANOVIĆ E. Wireless sensor networks for personal health monitoring: issues and an implementation [J]. *Computer Communications*, 2006, 29(13-14): 2521-2533.
- 6 陈鸿龙, 王志波, 王智, 等. 针对虫洞攻击的无线传感器网络安全定位方法[J]. *通信学报*, 2015, 36(3): 110-117.  
CHEN Honglong, WANG Zhibo, WANG Zhi, et al. Secure localization scheme against wormhole attack for wireless sensor networks [J]. *Journal on Communications*, 2015, 36(3): 110-117. (in Chinese)
- 7 AQUINO-SANTOS R, GONZALEZ-POTES A, EDWARDS-BLOCK A, et al. Developing a new wireless sensor network platform and its application in precision agriculture[J]. *Sensors*, 2011, 11(12): 1192-1211.
- 8 MATESE A, DI GENNARO S F, ZALDEI A, et al. A wireless sensor network for precision viticulture: the NAV system[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2009, 69(1): 51-58.
- 9 张波, 罗锡文, 兰玉彬, 等. 基于无线传感器网络的无人机农田信息监测系统[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(17): 176-182.  
ZHANG Bo, LUO Xiwen, LAN Yubin, et al. Agricultural environment monitor system based on UAV and wireless sensor networks [J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(17): 176-182. (in Chinese)
- 10 胡瑾, 樊宏攀, 张海辉, 等. 基于无线传感器网络的温室光环境调控系统设计[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(4): 160-167.  
HU Jin, FAN Hongpan, ZHANG Haihui, et al. Design of regulation system of light environment in greenhouse based on wireless sensor network[J]. *Transactions of the CSAE*, 2014, 30(4): 160-167. (in Chinese)
- 11 黄建清, 王卫星, 姜晟, 等. 基于无线传感器网络的水产养殖水质监测系统开发与试验[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(4): 183-190.  
HUANG Jianqing, WANG Weixing, JIANG Sheng, et al. Development and test of aquacultural water quality monitoring system based on wireless sensor network[J]. *Transactions of the CSAE*, 2013, 29(4): 183-190. (in Chinese)
- 12 孙宝霞, 王卫星, 雷刚, 等. 基于无线传感器网络的稻田信息实时监测系统[J/OL]. *农业机械学报*, 2014, 45(9): 241-246. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20140939&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140939&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.09.039.  
SUN Baoxia, WANG Weixing, LEI Gang, et al. Real-time monitoring system for paddy environmental information based on wireless sensor network[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(9): 241-246. (in Chinese)
- 13 陈瑜, 张铁民, 孙道宗, 等. 基于无线传感器网络的设施农业车辆定位系统设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(10): 190-197.  
CHEN Yu, ZHANG Tiemin, SUN Daozong, et al. Design and experiment of locating system for facilities agricultural vehicle based on wireless sensor network[J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(10): 190-197. (in Chinese)
- 14 王嘉宁, 牛新涛, 徐子明, 等. 基于无线传感器网络的温室 CO<sub>2</sub> 浓度监控系统[J/OL]. *农业机械学报*, 2017, 48(7): 280-285. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20170735&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170735&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.07.035.  
WANG Jianing, NIU Xintao, XU Ziming, et al. Monitoring system for CO<sub>2</sub> concentration in greenhouse based on wireless sensor network[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(7): 280-285. (in Chinese)
- 15 张小栓, 刘贺, 崔衍, 等. 钾肥生产原卤井无线传感器网络监测系统[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(增刊): 199-205.  
ZHANG Xiaoshuan, LIU He, CUI Yan, et al. Monitoring system for brine well in production of potash fertilizer based on wireless sensor network[J]. *Transactions of the CSAE*, 2017, 33(Supp.): 199-205. (in Chinese)
- 16 LIU Z, DAI L, MA K, et al. Balance energy-efficient and real-time with reliable communication protocol for wireless sensor network[J]. *The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications*, 2013, 20(1): 37-46.
- 17 SEETHARAM A, BHATTACHARYYA A, NASKAR M K, et al. Estimation of node density for an energy efficient deployment scheme in wireless sensor network[C]//3rd IEEE/Create-Net International Conference on Communication System Software and Middleware, COMSWARE, 2007: 95-98.
- 18 文韬, 洪添胜, 李震, 等. 橘园无线传感器网络不同节点部署方式下的射频信号传播试验[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(6): 211-215.  
WEN Tao, HONG Tiansheng, LI Zhen, et al. Test of wireless sensor network radio frequency signal propagation based on different node deployments in citrus orchards[J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(6): 211-215. (in Chinese)
- 19 方震, 赵湛, 郭鹏, 等. 基于 RSSI 测距分析[J]. *传感技术学报*, 2007, 20(11): 2526-2530.  
FANG Zhen, ZHAO Zhan, GUO Peng, et al. Analysis of distance measurement based on RSSI[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2007, 20(11): 2526-2530. (in Chinese)
- 20 李震, 洪添胜, 洪涯, 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.  
LI Zhen, HONG Tiansheng, HONG Ya, et al. Path-loss prediction for radio frequency signal of wireless sensor network in field

- based on artificial neural network[J]. Transactions of the CSAE,2010, 26(12):178-181. (in Chinese)
- 21 李小敏,臧英,罗锡文,等. 兰花大棚内无线传感器网络 433 MHz 信道传播特性试验[J]. 农业工程学报, 2013,29(13): 182-189.  
LI Xiaomin, ZANG Ying, LUO Xiwen, et al. Experiment of propagation characteristics based on 433 MHz channel of WSN in orchid greenhouse[J]. Transactions of the CSAE,2013, 29(13):182-189. (in Chinese)
- 22 王健明. 发射功率可变的无线传感器网络能量级别选取[J]. 计算机工程, 2009,35(13): 108-110.  
WANG Jianming. Energy level selection for wireless sensor network with variable transmit power[J]. Computer Engineering, 2009, 35(13):108-110. (in Chinese)
- 23 曾志文,陈志刚,刘安丰. 无线传感器网络中基于可调发射功率的能量空洞避免[J]. 计算机学报, 2010,33(1): 12-22.  
CENG Zhiwen, CHEN Zhigang, LIU Anfeng. Energy-hole avoidance for WSN based on adjust transmission power[J]. Chinese Journal of Computer, 2010, 33(1):12-22. (in Chinese)
- 24 ZHAO X, ZHUANG Y, WANG J. Local adaptive transmit power assignment strategy for wireless sensor networks[J]. Journal of Central South University, 2012, 19(7): 1909-1920.
- 25 王慧娇,邱赞,董荣胜,等. 一种无线传感器网络能耗均衡的自适应拓扑博弈算法[J]. 控制与决策, 2017: 1-9.  
WANG Huijiao, QIU Zan, DONG Rongsheng, et al. Energy balanced and self adaptation topology control game algorithm for wireless sensor networks[J]. Control and Decision, 2017: 1-9. (in Chinese)
- 26 邵奇可,冯淑娜,毛科技. 面向 WSN 的自适应模糊功率控制算法研究[J]. 传感技术学报, 2015, 28(4): 563-571.  
SHAO Qike, FENG Shuna, MAO Keji. A dynamic adaptive fuzzy algorithm for power control in wireless sensor networks[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2015, 28(4): 563-571. (in Chinese)
- 27 贾燕燕,谢志军. 基于 PID 神经网络的无线体域网功率控制算法研究[J]. 计算机应用研究, 2018,35(9): 1-3.  
JIA Yanyan, XIE Zhijun. Research on power control algorithm of wireless domain network based on PID neural network [J]. Application Research of Computers, 2018, 35(9): 1-3. (in Chinese)
- 28 CORREIA L H A, MACEDO D F, DOS SANTOS A L, et al. Transmission power control techniques for wireless sensor networks [J]. Computer Networks, 2007, 51(17): 4765-4779.
- 29 徐强,陈健. 功率控制技术在可靠连通无线传感器网络中的应用研究[J]. 电子学报, 2008,36(7): 1451-1455.  
XU Qiang, CHEN Jian. Application study of transmit power control technology in reliably connected wireless sensor network[J]. Acta Electronica Sinica,2008, 36(7): 1451-1455. (in Chinese)
- 30 王沁,万亚东,段世红,等. 一种高可靠无线传感器网络自适应跳频算法[J]. 小型微型计算机系统, 2010,31(9): 1735-1741.  
WANG Qin, WAN Yadong, DUAN Shihong, et al. Adaptive frequency hopping method for high reliable wireless sensor networks [J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2010, 31(9):1735-1741. (in Chinese)
- 31 黄庭培,李栋,张招亮,等. 突发性链路感知的自适应链路质量估计方法[J]. 通信学报, 2012,33(6): 30-39.  
HUANG Tingpei, LI Dong, ZHANG Zhaoliang, et al. Bursty-link-aware adaptive link quality estimation method[J]. Journal on Communications, 2012, 33(6):30-39. (in Chinese)
- 32 李小敏,臧英,罗锡文,等. 基于发射功率自适应的稻田无线传感器网络节点设计[J]. 农业工程学报, 2014,30(7): 140-146.  
LI Xiaomin, ZANG Ying, LUO Xiwen, et al. Design of WSN node with adaptive transmitting power for rice field[J]. Transactions of the CSAE,2014, 30(7):140-146. (in Chinese)
- 33 徐立鸿,早明华,蔚瑞华,等. 温室无线传感器网络节点发射功率自适应控制算法[J]. 农业工程学报, 2014,30(8): 142-148.  
XU Lihong, ZAO Minghua, YU Ruihua, et al. Adaptive control algorithms of transmitting power for greenhouse WSN nodes[J]. Transactions of the CSAE,2014, 30(8):142-148. (in Chinese)
- 34 石繁荣,黄玉清,任珍文,等. 自适应 Tree-Mesh 结构的大棚无线监测网络设计[J]. 农业工程学报, 2013,29(5): 102-108.  
SHI Fanrong, HUANG Yuqing, REN Zhenwen, et al. Design of adaptive Tree-Mesh hybrid wireless sensor networks for greenhouses[J]. Transactions of the CSAE,2013, 29(5):102-108. (in Chinese)
- 35 刘军,孙茜,李少华,等. 基于定向天线的无线自组网拓扑控制算法[J]. 东北大学学报:自然科学版, 2012,33(9): 1257-1260.  
LIU Jun, SUN Qian, LI Shaohua, et al. Topology control algorithm based on directional antennain wireless Ad hoc networks[J]. Journal of Northeastern University: Natural Science, 2012, 33(9):1257-1260. (in Chinese)
- 36 单志龙,兰丽. Ad hoc 网络中基于定向天线的 MAC 协议[J]. 计算机工程, 2010,36(2): 21-24.  
SHAN Zhilong, LAN Li. MAC protocols based on direction antennas in Ad hoc networks[J]. Computer Engineering, 2010, 36(2):21-24. (in Chinese)
- 37 张衡,陈东义,刘冰,等. 无线传感器网络天线的应用选择研究[J]. 电子科技大学学报, 2010,39(增刊): 85-88.  
ZHANG Heng, CHEN Dongyi, LIU Bing, et al. Research on the orientation of antenna in WSN[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2010, 39(Supp.):85-88. (in Chinese)