



黄志宏, 张 波, 兰玉彬, 等. 基于 UAV-WSN 的农田数据采集[J]. 华南农业大学学报, 2016, 37(1): 104-109.

基于 UAV-WSN 的农田数据采集

黄志宏¹, 张 波^{1,2}, 兰玉彬², 周志艳², 巫莉莉¹

(1 华南农业大学 现代教育技术中心, 广东 广州 510642;

2 广东省农业航空应用工程技术中心/华南农业大学 工程学院, 广东 广州 510642)

摘要:【目的】将 UAV(Unmanned aerial vehicle)引入传统的 WSN(Wireless sensor network)中,可给静态 WSN 系统带来移动性和灵活性。通过将 UAV-WSN 结合起来应用于农田信息监测,有效地扩展单个 WSN 的覆盖面积,增强网络的鲁棒性,解决静态 WSN 在恶劣的自然环境中被划分成无法有效通信的独立子网所带来的农田监测信息采集失败的问题。【方法】选择 3 个物理位置独立的地块构建分簇的 WSN 网络,将 UAV-WSN 结合起来,系统中的传感器节点采用休眠-唤醒-工作-休眠的工作周期,利用 UAV 上的移动采集节点与 UAV 飞行轨迹经过的地面上的独立子网交互并采集农田信息,通过移动节点携带的 3G 网络将农田信息传输到农田监测数据中心。【结果】地块间距离超过 100 m、UAV 飞行高度维持在 10 m 时,UAV-WSN 网络能够较好地完成农田信息采集任务,UAV-WSN 的通信质量明显优于静态 WSN 的通信质量,地块 1、2 和 3 的平均链路消耗分别降低了约 10%、27% 和 14%,平均丢包率降低了约 24%、68% 和 29%。【结论】UAV-WSN 结构的网络通信扩展了静态 WSN 的传输距离、提高了 WSN 系统的能量效率、延长了系统的生命周期,可以为大面积的平原或山地环境下的农田信息采集提供参考。

关键词:无人飞行器;无线传感网;农田信息;数据采集;精准农业

中图分类号:TP393;S126

文献标志码:A

文章编号:1001-411X(2016)01-0104-06

Farm field data collection based on UAV-WSN

HUANG Zhihong¹, ZHANG Bo^{1,2}, LAN Yubin², ZHOU Zhiyan², WU Lili¹

(1 Modern Education and Technology Center, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China;

2 Engineering Research Center for Agricultural Aviation Application of Guangdong Province/College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract:【Objective】To design a collaborative system made up of Unmanned aerial vehicle(UAV) and Wireless sensor network (WSN), which was applied to farmland information monitoring. The function of the system is to provide farm managers with situational awareness of their field and crop by using a WSN linked through a mobile node and carried by a UAV. 【Method】Three independent plots were chosen to build a separate clustering WSN system in which sensor nodes adopted the working cycle of hibernation, wakeup, work and hibernation. The mobile sensor of UAV communicated with the ground sensors along with the UAV flight trajectory to collect farmland data and to transmit the farmland information to the farmland monitoring data center using 3G network. 【Result】The system could well complete farmland information collection when the distance between the blocks was more than 100 meters and UAV flight level was 10 meters. The communication quality of UAV-WSN was better than that of static WSN. The average link cost(ALC) dropped by about 10%, 27% and 14% and the average packet loss rate (APLR)

收稿日期:2015-05-12 优先出版时间:2015-12-07

优先出版网址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/44.1110.s.20151207.1133.036.html>

作者简介:黄志宏(1981—),男,实验师,硕士, E-mail:huangzh@scau.edu.cn;通信作者:张 波(1973—),男,高级工程师,在职博士研究生, E-mail:zb@scau.edu.cn

基金项目:863 计划子项目(2013AA10230311);国家发改委下一代互联网技术研发、产业化和规模商用专项(CNGI-12-01-01)

<http://xuebao.scau.edu.cn>

reduced by about 24% , 68% and 29% in plot 1 ,plot 2 and plot 3 respectively. 【Conclusion】The system expands the static WSN transmission distance ,improves the energy efficiency and prolongs the life cycle. The results provide a reference for a large area of plain or mountain farmland information collection.

Key words: unmanned aerial vehicle ; wireless sensor network ; farmland information ; data collection ; precision agriculture

随着精细农业的发展,在农田数据采集中已经广泛采用了无线传感网^[1-2]。但是在传统的静态 WSN(Wireless sensor network)网络中,网关节点周围的传感器节点需要在转发数据上耗费大量的能量,而这些传感器节点过早地耗尽能量将造成网络内能耗不均,导致整个系统出现故障^[3-4]。此外,数据包在网络中经过的跳数越多,其发生错误的概率也就越大。而在传统的 WSN 中引进移动采集节点所组成的 MSWSN(Mobile sink WSN)则在多方面具有先天的优势,在 MSWSN 中,可以通过移动采集节点的运动来减少数据包从数据源节点发送到数据目的节点所经过的跳数,从而提高采集信息的质量,减少系统中数据包的重传,也减少系统的能量消耗。由于系统的能量消耗变得相对均匀,从而延长了整个系统的生存时间^[5-7]。MSWSN 所具有的另一个优势在于 MSWSN 系统更易于追踪目标信息。在 WSN 中,大部分的无线传感器节点都是被随机部署在目标区域内的,这种部署方式并不精确。因此部署的无线传感器节点并不一定处于监测目标的最好位置,而移动的信息采集节点可以更好地移动到适合于收集信息的位置,以提高监测目标的准确性。而在较为稀疏的网络中或者通信断开的网络中,移动的信息采集节点还可以通过自己的移动性来提高系统的通信效率。将移动采集节点应用到 WSN 中还可以提高所采集信息的保真度。同时,包含移动采集节点的 WSN 系统的容量增益比传统的 WSN 网络多 3 ~ 5 倍,提高了整个 WSN 系统的信息收集效率^[7-9]。

UAV(Unmanned aerial vehicle)是作为移动节点很好的选择。这主要是由于如下 2 个原因:一方面 UAV 具有相当好的灵活性和有用性,可以执行多种类型的信息采集任务,并且 UAV 可以重复多次地执行其飞行路径,以收集更多需要的信息;另外, UAV 还可以抵达偏远地区或严酷的环境,这也扩大了信息收集的范围^[10-14]。本研究将 UAV 引入传统的 WSN 中,将 UAV-WSN 结合起来应用于农田信息监测,从而有效地扩展单个 WSN 的覆盖面积,以解决

无线传感器节点受风吹雨打、动物破坏、植物屏蔽等恶劣的自然环境影响而导致农田监测信息采集失败的问题。

1 UAV-WSN 系统的结构和设计

1.1 UAV-WSN 农田数据采集系统的结构

UAV-WSN 农田数据采集系统对位于农田信息采集区域内监测目标的信息进行感知、收集和处理,并把这些得到的农田信息发送给监测数据中心。该系统由 4 个部分组成(图 1): UAV、无线传感器节点、感知对象和监测数据中心,这 4 个部分之间通过无线网络进行相互通信,最常见的方式是通过 ad-hoc 网络,无线传感器节点可以是信息的发送和接收单元,也可以充当网络中的中继单元。无线传感器节点由电源、嵌入式处理器、存储、通信部件和软件等部分组成。监测数据中心包括收集到的感知信息的接收存储和数据处理部分。监测数据中心的数据可以被用户、计算机或其他设备访问。用户可以主动查询或收集传感器网络的感知信息或被动地接受传感器网络所发布的感知信息。用户对监测数据中心收集到的感知信息进行分析 and 数据挖掘,并根据分析的结果做出决策或采取相应的行动。感知对象是用户所感兴趣的目标和执行监测任务的 WSN 的感知物体,感知对象的主要内容包括物理现象、化学现象和其他数字信号。

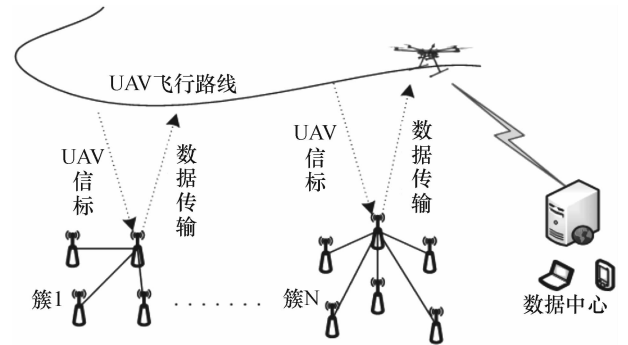


图 1 UAV-WSN 农田数据采集基本结构

Fig. 1 The basic structure for UAV-WSN farmland data collection

WSN 是由无线传感器节点、信息处理单元和无线通信模块组成的一个自组织网络系统。其执行的任务包括采集环境中感兴趣的各種目标信息,目标信息被采集到该信息的无线传感器节点,通过单跳或多跳的方式发送至目的节点或特定的接收者;当数据通过中继节点进行传递时,通常需要通过某种方式进行消除冗余和提取信息的步骤。UAV 可以是固定翼或者是单/多旋翼无人驾驶飞机,在 UAV 上安装可以与地面传感网通信的节点,并通过 GPRS 或者 3G 模块与数据中心通信,将地面传感网感知和收集到的数据传输到数据中心。数据中心对 UAV 进行控制并与其进行通信,UAV 从某一点进入目标信息采集区域并按预定的路径执行信息采集任务。UAV 向通信距离内的传感器节点发送信标信号(Beacon signal),无线传感器向 UAV 返回其采集到的农田环境信息,UAV 将信号传送回数据中心^[11-12]。

1.2 UAV-WSN 农田数据采集系统的设计

1.2.1 WSN 的设计 无线传感网主要是由部署在目标信息区域内的无线传感器节点之间的网络组成,网络中的无线传感器节点在目标信息区域内感知并收集环境信息。传统的农田监测 WSN 网络由于监测目标覆盖面广,往往需要布设大量的无线传感器节点,并保证节点之间的通信链路正常。这种大规模的 WSN 数据的传输需要多跳传递才能将所需的数据从数据源节点发送至信息采集节点,这也导致信息采集节点周围承担大量数据转发任务的节点因过早地耗尽能量而退出网络。由于风吹雨打、动物破坏、植物屏蔽等原因,静态 WSN 系统的网络拓扑经常发生变化,WSN 随时可能被划分成独立子网,这些独立子网之间无法互相通信,导致只有离基站最近的目标物体可以被监测到。

为了解决上述问题,本研究构建 UAV-WSN 农田移动无线传感网,在以 UAV 为移动应用采集节点的 WSN 网络中,选择了以簇为通信单元的拓扑结构设计,包含多个相对独立的无线传感网络簇,每个簇由物理位置上相邻的多个无线传感器节点组成,由簇首负责与移动节点通信非簇首节点负责采集数据,如图 1 中的簇 1 或簇 N 所示。这种结构的设计提高了 WSN 的鲁棒性,WSN 不会因为某簇或者簇中的某个结点失效而导致数据无法采集。

每个簇中的无线传感器节点都有 2 个状态,即睡眠状态和唤醒状态。平时无线传感器节点处于睡眠状态,当簇首节点接受到从 UAV 发出的无线信标信号时,簇首节点会通知所有节点进入唤醒状态。在唤醒状态中无线传感器节点将采集到的数据通过网络传输给簇首节点,与 UAV 进行必要的通信,当

其成功地将所采集的信息数据发送给 UAV 或 UAV 并飞离可通信区域后,簇中的无线传感器节点将重新进入睡眠状态。这种睡眠-唤醒机制可以减少无线传感器节点的能量消耗,延长工作时间,从而提高系统的整体能量效率^[15-18]。

1.2.2 UAV 搭载的移动节点的设计 移动采集节点是配备无线通信模块的 UAV。在信息接入节点的控制下,UAV 在目标信息区域执行相应的任务,通过与各个无线传感器节点簇进行通信,收集无线传感器节点采集到的环境信息。

1.2.3 数据中心的设计 数据中心主要包括系统中的基站和服务器、存储设备,基站负责与 UAV 进行通信连接。一般来说,数据中心具有较强的数据处理能力和较高的能量储备,且具有较强的抗毁性。数据中心会通过 3G 或 4G 网络向 UAV 发送指令,控制其运动路线并执行特定的任务。

1.2.4 通信部分(网络结构)的设计 对于无线传感器节点而言,由于其自身能量消耗的限制和处理能力的限制,在考虑无线传感器节点的网络通信结构时,要考虑物理层、MAC(Medium Access Control)层和网络层设计,其中,网络层主要考虑的是 WSN 系统的路由设计,而 MAC 层和物理层则主要进行数据传输。

1)MAC 层通信设计:为了能够在良好的能量效率约束下提供更高的系统吞吐率,MAC 层协议十分重要。因为 MAC 协议起着协调各个无线传感器节点以共用无线媒体资源的作用。MAC 协议允许处于同一个网络内的无线传感器节点共享一个公用无线信道。MAC 协议最主要的任务就是在保证较好的能量效率、较低的系统时延以及节点公平性的同时,避免网络中发生并发传输,并减少数据包的冲突率。系统采用了 CSMA/CA(Carrier sense multiple access with collision avoidance)协议,利用 ACK 信号来避免冲突的发生。CSMA/CA 协议工作过程中,首先在送出数据前,监听信道状态,在无人使用信道并维持一段时间后,才送出数据。由于每个设备采用的随机时间不同,这样可以减少冲突的机会。另外,在送出数据前,先送一段小小的请求传送报文给目标端,等待目标端回应报文后,才开始传送。利用握手程序,确保接下来传送资料时,不会被碰撞。由于握手程序的封包都很小,让传送的无效开销变小。CSMA/CA 通过这种方式来提供无线的共享访问,这种显式的 ACK 机制在处理无线问题时非常有效。虽然增加了一定的开销,但是对于整个 UAV-WSN 的性能影响很小。

2)网络层通信设计:在 UAV-WSN 的体系结构中,WSN 内部节点之间以及 WSN、UAV 移动节点之间采用 Zigbee 协议进行通信。UAV 移动节点与基站之间采用 3G,UAV 移动节点具有良好的存储转发功能,在执行飞行任务过程中,如果由于移动运营商提供的服务质量出现问题、或者由于飞行过程中带来的不稳定,导致数据无法及时传送到数据中心,移动节点会暂时存储数据,待 3G 通信恢复正常时,继续传送数据,从而大大提高了 UAV-WSN 系统的可靠性。

2 数据采集的试验设备与方法

2.1 试验设备及参数

设备包括节点和移动基站(图 2)。试验中 WSN 传输节点采用 Crossbow eN2120,具体参数见表 1;移动节点采用 SBC6020 模块,具体参数见表 2。

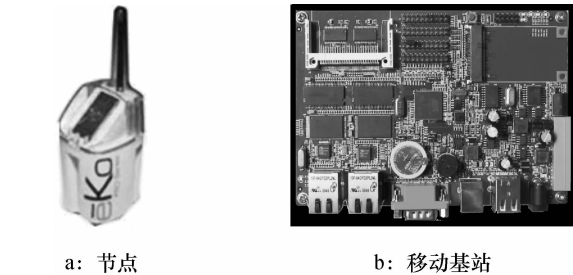


图 2 UVA-WSN 的试验设备
Fig.2 UVA-WSN experimental setup

表 1 WSN 传输节点参数

参数项	参数值
CPU	Atmel 1281
通信芯片	AT86RF230
通信频率	2 405 ~ 2 480 MHz
速率	250 Kbps
MAC 层协议	基于 IEEE802. 15. 4 协议
外部 Flash	512 Kbps
天线	外置,偶极
供电	2. 7 ~ 4. 2 V
操作系统	tinyos 2. 1. 1

2.2 方法

试验在华南农业大学岑村教学实习基地进行,试验选择了 3 个地块,每个地块之间的相互距离超过 100 m,以使得每个地块内部的无线传感器网络能够独立成簇,并且不会干扰和影响到其他地块内的节点工作。部署了静态 WSN 和 UAV-WSN 2 种网络环境,对 3 个地块中的农田数据进行采集,并在采集的过程中收集各传输节点的数据传输情况,对这 2 种环境下的数据传输质量进行统计和对比分析。

表 2 移动节点参数表
Tab.2 Mobile node parameters

参数项	参数值
CPU	AT91SAM9G20 ,ARM926EJ-S 核, 400 MHz
RAM	64 Mb SDRAM
ROM	4 Mb NorFlash, 128 MB NandFlash, 2 Kb EEPROM
串口	DEBUG; RS232, COM0/1/2/3/4/5: 默认 RS232/TTL 5 线功能
CAN-Bus	1 路数据及电源隔离 CAN-Bus2.0 总线
SPI	集成在 MiniPCI 接口
CPU 内置以太网	10/100 Mbps 以太网,DM9161BIEP
USB Host	2 路 USB 2.0 Host 控制器 12 Mbps
USB Device	1 路 USB 2.0 Device 控制器
采集输入	4 路 10 位 AD 转换控制器
MiniPCI 接口	集成 SDIO, SPI, UART, USB, 可以扩展 3G 模块、GPS 模块、GPRS/GSM 模块、CDMA 模块、WiFi/蓝牙模块
系统电源	宽 8. 4 ~ 15. 6 V 输入,默认 12 V 电源输入
蜂鸣器	IO 控制

2.2.1 数据采集 1)静态 WSN 环境下数据采集:每个地块放置了 2~3 个无线传感器节点和 1 个固定基站,地块 1 放置节点 1、2、3 和基站 1,地块 2 放置结点 4、5 和基站 2,地块 3 放置节点 6、7、8 和基站 3(图 3)。地块 n 中的传输节点先利用 XMesh 多跳自组网协议与地块 n 中具有相同 Channel ID 的基站完成组网,节点联通后开始通信,并通过网关发送指令,连接传感器的节点收到指令后按照设定的频率完成农田数据的定时采集和传输,并同时 将农田数据和节点数据传输情况发回网关。

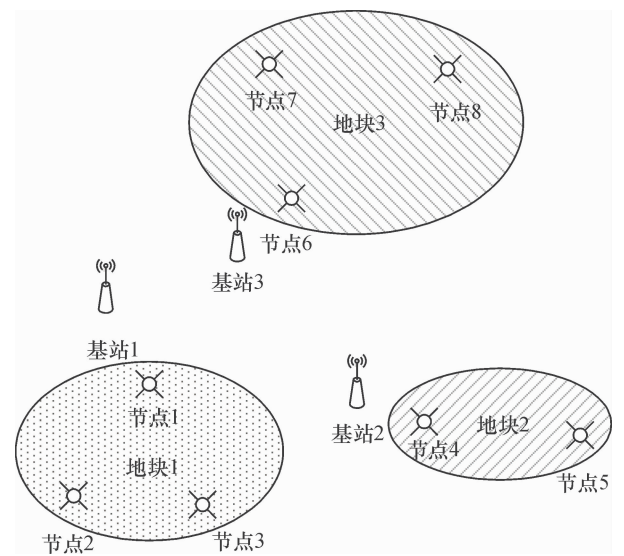


图 3 3 个地块的静态 WSN 分簇试验
Fig.3 The static WSN clustering experiments in 3 plots
<http://xuebao.scau.edu.cn>

2) UAV-WSN 环境下数据采集:每个地块放置了 2~3 个无线传感器节点,地块 1 放置节点 1、2、3,地块 2 放置节点 4、5,地块 3 放置节点 6、7、8(图 4)。基站通信距离为 300 m,从组网到完成数据采集时间最长需 60 s,为了准确地采集各地块的数据,根据试验环境及系统参数的相关设置,试验中将无人机的飞行速度设置为 $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,飞行高度设置为 10 m,基站与地面节点之间的通信窗口最大可以达到 598 s,这个时间足以完成数据采集。

通过地面站系统预先规划无人机航线可实现飞机自主飞行作业。此时,飞机携带基站在空中按照预先设定的轨迹飞行,飞行过程中在地块 n 的上方与地块 n 交互,并收集地块 n 中采集到的农田数据。

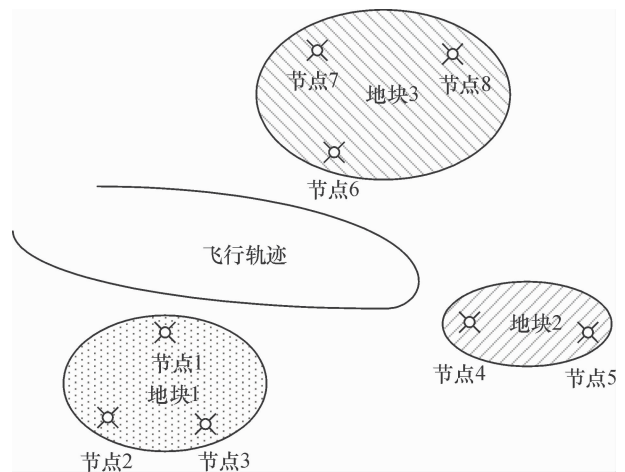


图 4 3 个地块 UAV-WSN 的分簇试验

Fig. 4 The UAV-WSN clustering experiments in 3 plots

飞机到达指定地块上空前,各传输节点处于休眠状态,此时节点只开启部分监听功能。当携带移动节点的飞机到达指定地块上空时,具有相同 Channel ID 的基站与各传输节点先利用 XMesh 多跳自组网协议完成组网,节点联通后开始通信,并通过网关发送指令将各节点唤醒,接着传感器完成数据采集,传输节点完成数据的传输,网关接收完农田数据和数据传输情况后,飞机飞离该地块。

2.2.2 传输质量统计方法 试验通过收集各传输节点的数据发送和接收情况,并结合相关的计算公式对各地块的网络进行链路消耗和丢包率统计。

$$E_{plr} = (1 - P_r/P_s) \times 100\%, \tag{1}$$

式中, E_{plr} 为丢包率, P_r 是基站从单个节点接收到的数据包数量,它是基站根据节点实际发送过来的数据包计算得到的; P_s 是单个节点向基站发送的数据包总数量,它是基站根据该节点发送过来的数据包中标识包序号的字段值得来的。

$$E_c = 255 \times P_{nr}/(P_{nr} + P_{nm}), \tag{2}$$

式中, E_c 是链路评估值, P_{nr} 是节点接收包的数量, P_{nm} 是节点丢失包的数量。

$$E_r = (1 - \alpha) \times E_r + \alpha E_c, \tag{3}$$

式中, α 是指数加权移动平均数算法的因子,取值范围[0,1], E_r 是节点接收评估值,取值范围[0,255]。

$$LC = (1 < < 18)/E_s E_r, \tag{4}$$

式中, E_s 是节点发送评估值,与邻居节点的 E_r 一致,可根据对方发出的 Router 包,来获得自己的 E_s ,LC 是节点与邻居节点之间的链路消耗值。

$$OC = LC + NC, \tag{5}$$

式中,NC 是节点的邻居节点到达基站的链路消耗值,OC 是节点到达基站的链路消耗值。

3 结果与分析

根据公式(1),可以计算出每个地块不同节点与基站之间数据传输的丢包率。根据公式(2)~(5),可以计算出每个地块中不同节点与基站之间的链路消耗,结果见表 3。

表 3 每个地块中静态 WSN 和 UAV-WSN 的平均链路消耗和丢包率¹⁾

Tab. 3 Average link cost and packet lost rate of static WSN and UAV-WSN in each plot

地块	链路消耗		丢包率/%		经度	纬度
	I	II	I	II		
1	8.7	8.0	1.76	1.34	113°21'39.33"	23°10'01.41"
2	9.5	7.0	4.00	1.28	113°21'44.09"	23°10'02.77"
3	9.0	7.7	1.81	1.29	113°21'45.58"	23°10'06.32"

1) I:静态 WSN 网络,II:UAV-WSN 网络。

表 3 的结果表明,利用静态 WSN 网络进行数据采集时,由于基站部署位置和高度相对固定,受地块周边自然环境影响导致链路消耗和丢包率较大。而利用 UAV-WSN 网络进行数据采集时,由于基站跟随无人机能够动态改变采集位置,并且空中比地面受到的干扰要少,可以有效地避免环境影响,降低链路消耗和丢包率。与静态 WSN 网络相比,利用 UAV-WSN 网络地块 1 的平均链路消耗降低了约 10%,平均丢包率降低了约 24%;地块 2 的平均链路消耗降低了约 27%,平均丢包率降低了约 68%;地块 3 的平均链路消耗率降低了约 14%,平均丢包率降低了约 29%。可见,利用 UAV-WSN 网络进行数据采集时的通信质量明显优于静态 WSN 网络。

4 结论

本文提出的将 UAV 与 WSN 结合起来,应用到农田数据采集中,充分利用了空中的移动节点与地

面的无线传感节点之间的良好通信,解决了大面积农田数据采集环境中无线传感器网络由于环境恶劣而带来的网络通信质量不良,网络被划分成独立子网相互无法通信的问题。

通过搭建试验环境,利用多旋翼无人飞行器携带无线移动通信节点,利用 Crossbow 无线传感器组网,开展了田间试验,试验结果表明:1) UAV-WSN 结构的网络通信质量优于传统的 WSN 网络通信质量;2) UAV-WSN 结构的农田信息采集扩展了传统 WSN 结构的农田信息采集范围;3) UAV-WSN 结构中采用的唤醒-休眠方式减少了无线传感器节点的能耗,提高了整个系统的生命周期。虽然试验只是在 3 个地块的环境中得以实现,但是系统可以利用到更广阔的田间环境中去。在无人机进行施肥、喷药、授粉作业过程中,同步进行高效、稳定的农田信息采集,提高了无人机的飞行使用效率;在无人机单独进行信息采集作业时,根据实际需要来设定合适的采样频率,可以降低使用成本。今后将进一步结合农业航空应用中的风力、风速以及雾滴喷施效果进行研究,快速利用信息分析处理的结果为农业精准喷施提供良好的决策支持。

参考文献:

[1] 肖克辉,罗锡文,陈剑,等. 无线水分传感器网络分路定点击路由[J]. 农业工程学报, 2012, 28(19): 137-144.

[2] 肖德琴,古志春,冯健昭,等. 稻田水分监测无线传感器网络优化设计与试验[J]. 农业工程学报, 2011, 27(2): 174-179.

[3] 汤波. 无线传感器网络低功耗数据路由协议与传输技术研究[D]. 成都:电子科技大学, 2010:29-44.

[4] 邓翰林,李磊,黄河清,等. 无线传感网簇头轮换能耗分析与改进策略[J]. 上海交通大学学报, 2011, 45(3): 317-320.

[5] BEKMEZCI I, SAHINGOZ O K, TEMEL S. Flying ad-hoc networks (FANETs): A survey[J]. Ad Hoc Networks, 2013, 11(3): 1254-1270.

[6] WANG J, GHOSH R K, DAS S K. A survey on sensor localization[J]. J Control Theo Appl, 2010, 8(1): 2-11.

[7] WANG W, VIKRAM S, CHUA K C. Using mobile relays to prolong the lifetime of wireless sensor networks[C]//ACM. MobiCom '05 proceedings of the 11th annual inter-

national conference on mobile computing and networking. New York:ACM, 2005:270-283.

[8] CHEN C, MA J M. Multi-radio enabled mobile wireless sensor network[C]//IEEE. AINA '06 proceedings of the 20th International conference on advanced information networking and applications. Washington: IEEE, 2006:291-295.

[9] VENKITASUBRAMANIAM P, ADIREDDY S, TONG L. Sensitivity and coding of opportunistic ALOHA in sensor networks with mobile access[J]. J VLSI Sig Proc, 2005, 41(3): 329-344.

[10] SHARMA V, KUMAR R. A cooperative network framework for multi-UAV guided ground ad hoc networks[J]. J Intel Robot Syst, 2015, 77(3/4): 629-652.

[11] JAWHAR I, MOHAMED N, AL-JAROODI J, et al. A framework for using unmanned aerial vehicles for data collection in linear wireless sensor networks[J]. J Intel Robot Syst, 2014, 74(1/2): 437-453.

[12] VALENTE J, SANZ D, BARRIENTOS A, et al. An air-ground wireless sensor network for crop monitoring[J]. Sensors, 2011, 11(1): 6088-6108.

[13] MARTINEZ-DE DIOS J R, FERD K L, DE SAN BERNABÉ A, et al. Cooperation between UAS and wireless sensor networks for efficient data collection in large environments[J]. J Intel Robot Syst, 2013, 70(1/2/3/4): 491-508.

[14] ERIC W, TIMOTHY X, BROWN T X. Networking issues for small unmanned aircraft systems[J]. J Intel Robot Syst, 2009, 54(1/2/3): 21-37.

[15] TROUBLEYN E, MOERMAN I, DEMEESTER P. QoS challenges in wireless sensor networked robotics[J]. Wireless Pers Commun, 2013, 70(3): 1059-1075.

[16] DANG P, BALLAL P, LEWIS F, et al. Real time relative and absolute dynamic localization of air-ground wireless sensor networks[J]. J Intel Robot Syst, 2008, 51(2): 235-257.

[17] SUJIT P B, HUDZIETZ B P, SARIPALLI S. Route planning for angle constrained terrain mapping using an unmanned aerial vehicle[J]. J Intel Robot Syst, 2013, 69(1/2/3/4): 273-283.

[18] DONG M X, OTA K, LIN M, et al. UAV-assisted data gathering in wireless sensor networks[J]. J Supercomput, 2014, 70(3): 1142-1155.

【责任编辑 庄 延,周志红】