

一种改进 ZigBee 算法及在温室 监控无线网络中的应用

周艳平, 马维军

(青岛科技大学 信息科学技术学院, 山东 青岛 266061)

摘要: 针对传统 ZigBee 路由算法中由于 RREQ 分组洪泛而导致的能量过度损耗和节点失效的问题, 提出了一种适用于无线网络的 ZigBee 路由优化算法; 算法通过控制 ZigBee 节点路由发现过程中 RREQ 分组的广播方向和广播范围、选择节点剩余能量值和链路质量值较优的节点的方式对 ZigBee 路由算法进行优化; 仿真结果表明优化后的 ZigBee 路由算法显著的降低了 ZigBee 网络的能耗, 降低了网络中节点失效概率, 提高了网络的生存时间; 所提出的算法应用于温室监控无线网络中, 得到了满意的效果。

关键词: 紫峰; 剩余能量; 链路质量; 温室监控

An Improved ZigBee Routing Algorithm and Its Application in Wireless Network of Greenhouse Monitoring

Zhou Yanping, Ma Weijun

(School of Computer Science, Qingdao University of Science & Technology, Qingdao 266061, China)

Abstract: Aiming at the problems of excessive energy loss and node failure caused by RREQ packet flooding in traditional ZigBee routing algorithms, a ZigBee routing optimization algorithm suitable for greenhouse monitoring wireless network was proposed. The ZigBee routing algorithm is optimized by controlling the broadcast direction and range of RREQ packets during the route discovery process, and selecting nodes with better node residual energy and LQI values. The simulation results show that the improved algorithm effectively reduces the energy loss of the ZigBee network, slows down the node failure process in the network, and improves the network survival time. The proposed algorithm has been applied to the wireless network of greenhouse monitoring and achieved satisfactory results.

Keywords: ZigBee; residual energy; LQI; greenhouse monitoring

0 引言

ZigBee 技术作为时下新兴的近距离无线传感网络通信技术, 具有距离短、功耗低、成本低和自组网等优点, 在工农业、军事、医疗和环境监测领域有着普遍的应用^[1-3]。近年来温室大棚因其突破地域、季节、气候等因素的限制, 在我国得到广泛的推广^[4]。但传统的温室大棚生产效率低, 人力成本高, 网络和信息技术的发展为温室大棚供了新的方向^[5]。

本文设计了一种改进 ZigBee 路由算法, 解决了 ZigBee 网络中由于 RREQ 分组洪泛而导致的能量过度损耗和节点失效的问题, 结合改进的 ZigBee 路由算法设计了温室监控无线网络, 实现了温室内农作物生长参数的实时采集、远程监测和控制功能。

1 ZigBee 网络路由

ZigBee 联盟将 ZigBee 网络中的节点分为协调器节点 (coordinator)、路由器节点 (router) 和终端节点 (end device)^[6]。IEEE802.15.4 标准从设备完整性的角度出发, 将 ZigBee 网络中的设备分成全功能型 (FFD) 和精简功能型 (RFD)。ZigBee 网络中的协调器负责发起和建立网络且协调器只能由 FFD 充任, 终端节点既可以由 FFD 充任也可以由 RFD 充任。ZigBee 网络分成星型网 (star)、网状网 (Mesh) 和簇树型 (cluster-tree) 3 种网络拓扑结构。星型网络的终端节点以协调器为中心呈星型分布, 终端节点必须处于协调器的通信范围之内, 致使星型网络的通信范围过小。网状网络中各节点之间可以直接或间接的进行通信, 具有高可靠性和高冗余性的特点, 但网状网络的拓扑结构复杂, 路由开销大。簇树型网络是一种分层次的网络拓扑结构, 吸收了星型网络和网状型网络的优点, 可扩展性强, 得到了广泛应用。

1.1 ZigBee 网络地址分配机制

ZigBee 网络中的节点具有一个 16 位的网络地址和一个 64 位 IEEE 地址, 64 位 IEEE 地址具有唯一性, 16 位的网络地址由父节点予以分配。ZigBee 网络采用 DAAM 分布式

收稿日期: 2020-03-09; 修回日期: 2020-03-28。

作者简介: 周艳平 (1976-), 男, 山东省临沂市人, 副教授, 硕士研究生导师, 主要从事智能优化算法、生产计划与生产调度方向的研究。

地址分配机制^[7]。在 DAAM 分布式地址分配机制中，定义 $Cskip(d)$ 函数用于计算父节点为子节点分配的地址偏移量，公式如下：

$$Cskip(d) = \begin{cases} 1 + C_m \times (L_m - d - 1), & \text{if } R_m = 1 \\ \frac{1 + C_m - R_m - C_m \times R_m^{L_m - d - 1}}{1 - R_m}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

其中： d 表示父节点深度， C_m 代表每个父节点能拥有的至多子节点的个数， L_m 代表网络的最大深度， R_m 代表父节点能拥有的至多路由器节点的数量^[8-9]。不同类型的节点分配地址的方式也不同。ZigBee 协调器节点地址为 0x00，新加入的节点按照加入顺序地址深度依次加 1，若新加入的节点是终端节点，其父节点通过式 (2) 计算节点的地址；若新加入的节点是路由器节点，其父节点通过式 (3) 计算节点的地址。

$$A_n = A_{parent} + Cskip(d) \times R_m + n \quad (2)$$

$$A_n = A_{parent} + (n - 1) \times Cskip(d) + 1 \quad (3)$$

在 ZigBee 网络中，每一个具有路由能力的节点都会维护一个在其一跳通信范围内的邻居表。在 ZigBee 协议中规定，邻居表包含了在其一跳范围内 ZigBee 节点的所有信息且其记录的内容会因为网络内节点的变化而保持实时更新。邻居表的实时更新有利于及时获取相邻节点信息，选择符合通信要求的节点。邻居表中记录的内容不是固定的，可根据需要在邻居表中添加一些特定的参数信息。

1.2 ZigBee 路由算法

目前在 ZigBee 网络常用的路由算法有 Cluster-Tree 路由算法和 AODVjr 路由算法。

Cluster-Tree 路由算法基于 ZigBee 地址分配机制计算下一跳节点的 16 位网络短地址，在传输方向上按照树形结构向上或向下传输。在 Cluster-Tree 算法中，结合式 (4) 辨别目的节点是否为自己的后代，根据式 (5) 计算出下一跳的地址，并将数据转发至下一跳节点。Cluster-Tree 路由算法传输效率低，且选择的传输路径不一定是最优路径，接近协调器的节点容易因能量低而脱离网络，致使网络瘫痪。

$$A < D < A + Cskip(d - 1) \quad (4)$$

$$N = \begin{cases} D, & \text{if } D > A + R_m \times Cskip(d) \\ A + 1 + \left\lfloor \frac{D - (A + 1)}{Cskip(d)} \right\rfloor \times Cskip(d), & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

AODVjr 算法是一种按需分配的路由协议，规定只有目的节点能发送路由应答分组 (RREP)，删除了先驱节点列表以及 hello 分组。AODVjr 算法路由发现过程如图 1 所示。在前向路由建立的过程中，节点在接收到 RREQ 后，选择跳数较少的 RREQ 并更新节点路由信息，直至目的节点接收到 RREQ。目的节点在接收到 RREQ 分组之后，选择跳数较少的路径向源节点发送 RREP 分组来创建反向路由^[10]。源节点收到 RREP 之后，准备进行数据的传输。AODVjr 路

由算法在路由发现过程中对 RREQ 分组的广播范围和广播方向没有限制，当网络规模较大时容易引起广播风暴，增加节点的能耗^[11]。

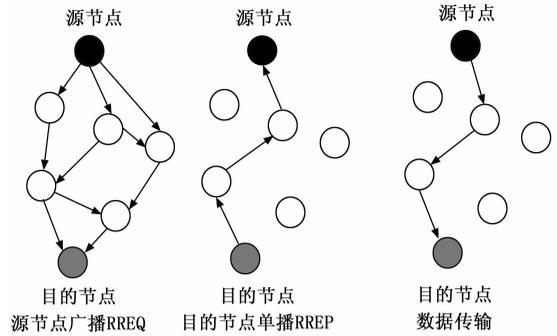


图 1 路由发现过程示意图

2 改进 ZigBee 路由算法

2.1 改进算法思路

针对 ZigBeeCluster-Tree 算法和 AODVjr 算法中存在的问题，提出一种优化的 ZigBee 路由算法，该算法以 AODVjr 算法为基础，结合 Cluster-Tree 算法，对 RREQ 分组的广播过程进行限制，并从节点的剩余能量值和链路质量入手，对 ZigBee 路由算法进行改进。

在 ZigBee 网络中，越靠近协调器的节点，数据转发量越大，需要对节点的剩余能量值进行估量，防止网络分割现象的出现。可运用下式对节点的剩余能量值进行估量：

$$E_{min} = \frac{1}{t} \times \sqrt{energy} \times \frac{1}{d_j + 1} \times \alpha \quad (6)$$

其中： E_{min} 表示节点最小剩余能量值， t 表示网络运行时间， $energy$ 表示节点初始能量， d_j 表示节点深度，为特定系数用于减缓 E_{min} 衰减的速度。

在 ZigBee 中规定的链路质量指示 (link quality indicator, LQI) 用于计量接收到的数据帧的强度与质量，衡量通信过程中数据包的丢失情况。LQI 的值可以通过下式计算得到。

$$LQI = \left\lfloor \frac{255 \times [91 - 10 \times nlg^d - A]}{91} \right\rfloor \quad (7)$$

其中： n 表示环境衰减因子， d 表示节点之间的间隔， A 表示节点发射端和接收端间隔 1 米时的信号强度。LQI 的取值在 0x00~0xFF 之间，当 LQI 的值大于 0x4B 时，表明节点接收到的数据帧的强度与质量满足通信要求，当 LQI 的值低于 0x32 时，节点接收到的数据帧的强度和质量较差，数据包的多次重传导致节点能量消耗加剧^[12-13]。

2.2 改进算法流程

在 Cluster-Tree 算法中，网络最大深度的 2 倍即 $2L_m$ 是可能存在的最大路径，故在优化算法中设置 RREQ 分组的最大广播范围为 $2L_m$ 。结合 Cluster-Tree 路由算法辨别目的节点是不是自己的子孙节点来控制 RREQ 分组的广播方向。在 RREQ 分组中设置标记位 Flag，Flag=0 则接收到 RREQ 的节点的子孙节点不广播该 RREQ，Flag=1 则接

收到该 RREQ 分组的节点的父节点不广播该 RREQ 分组。在路由节点中添加一个变量 Power 表示节点可用的能量值。

改进算法流程如下:

1) 源节点为终端节点时, 由父节点广播终端节点的数据。

2) 源节点为路由节点且其邻居表内未记录目的节点地址, 则启动路由发现过程, 并根据式 5) 设置 Flag 值。

3) 在路由发现阶段, 中间节点 B 在接收到节点 A 的 RREQ 分组之后, 检查 RREQ 分组的转发次数 (Hops) 以及中间节点自身的剩余能量值 (Power) 和链路质量 (LQI)。

4) 如果 $Hops > 2Lm$, 节点 B 丢弃该分组; 如果 $Power < E_{min}$, 节点 B 丢弃该分组; 如果 $LQI < 0 \times 32$, 节点 B 丢弃该分组。

5) 中间节点查询邻居表中是否记录该目的节点, 若有记录, 中间节点直接将 RREQ 分组发送给该邻居节点。否则 $Flag=0$ 时, 若节点 B 是节点 A 的子节点, 节点 B 不广播该 RREQ。若节点 B 是 A 的父节点, 且目的节点是节点 B 的子孙节点, 节点 B 在设置 $Flag=1$, Hops 加 1 后广播 RREQ 分组并替换 Power 值; 如果目的节点不是节点 B 的子孙节点, 则节点 B 保持 Flag 值不变, 替换 Power 值和 Hops 值之后, 转发 RREQ 分组。

$Flag=1$ 时, 若节点 B 是节点 A 的父节点, 节点 B 不广播该 RREQ 分组。若节点 B 是节点 A 的子节点, 且目的节点不是节点 B 的子孙节点, 则节点 B 不广播该 RREQ 分组; 若目的节点是节点 B 的子节点, 节点 B 保持 Flag 值不变, 更新 Power 值和 Hops 之后, 广播 RREQ 分组。

6) 目的节点在接收到 RREQ 之后, 按照 RREQ 的广播路径向源节点发送 RREP。源节点收到后, 按照该路径传输数据。

2.3 改进算法仿真

为了评估改进后的路由算法的性能, 在 NS2 仿真软件中从网络剩余能量、分组投递率以及网络节点死亡数量 3 个方面设置仿真实验, 对改进算法和传统算法进行仿真。

在仿真实验中, 设置网络范围为 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$, 网络参数 $Cm=5$, $Lm=6$, $Rm=4$, 数据包长度为 128 bits, 节点的初始能量值为 1 500 J, 采用 CBR 作为数据信息源, 在分析网络剩余能量和分组投递率时, 分别设置节点数量为 10~100 个不同的网络环境下进行仿真, 在分析网络节点死亡率时, 设置节点数量为 100。仿真实验结果如图 2~4 所示。

2.4 实验结果与分析

根据 NS2 仿真实验得出的结果, 从网络剩余能量、分组投递率以及网络死亡节点数量 3 个方面对仿真结果进行分析。

网络剩余能量百分比的值越高表明网络的剩余能量值越高, 网络的能量损耗也就越低, 网络的生命周期也就越长。该值可以通过网络剩余能量值和网络初始能量值计算

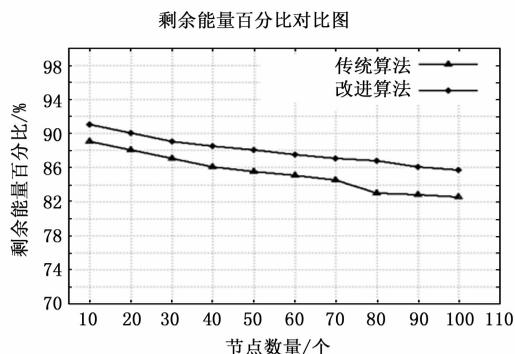


图 2 网络剩余能量百分比对比图

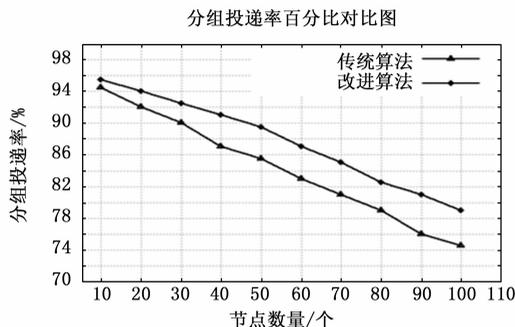


图 3 分组投递率对比图

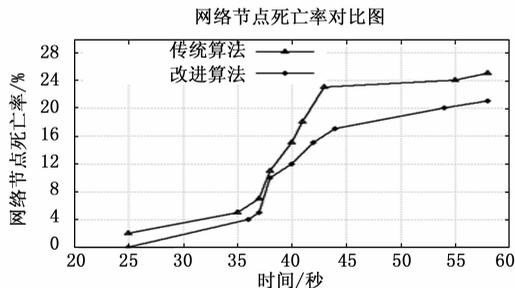


图 4 网络节点死亡率对比图

得到。分组投递率是接收数据分组与投递数据分组总数的比值, 体现了节点间的 LQI, 是衡量网络传输性能的关键指标。

从图 2 可以看出, 节点数量的逐步增多, 导致网络剩余能量百分比逐渐降低。改进的路由算法由于在路由发现阶段对 RREQ 分组的广播范围进行限制, 减少了不必要的能量损耗, 同时能量较低的节点不参与 RREQ 分组广播, 有效节省了网络的整体耗能。

从图 3 中可以看出, 由于改进的路由算法对 RREQ 分组的广播范围进行限制并选择 LQI 值符合要求的节点, 使得分组投递率得到提高。

从图 4 可以看出, 在网络运转的前期, 由于节点能量充裕, 节点死亡率为零, 随着网络的运转, 部分节点因频繁进行数据转发和数据接收, 导致节点能量耗尽, 节点死亡率逐渐升高。优化的 ZigBee 路由算法从节点的剩余能量

值入手，数据不广播给剩余能量值较低的节点，死亡节点出现的时间较晚且节点死亡率低于传统的路由算法，显著的提高网络的运行周期。

结合图 2~4 的仿真结果及上述分析，可以看出优化算法能够达到预期效果。

3 温室监控无线网络设计

结合改进的 ZigBee 路由算法，设计了一种基于 ZigBee 技术的温室监控无线网络，无线网络采用树型拓扑结构，在每个温室内设置一个路由节点和十至二十个终端节点。

3.1 硬件设计

温室监控无线网络由监控终端、ZigBee 网关以及上位机数据监控中心三部分构成，网络架构如图 5 所示。监控终端包括路由节点、采集及控制节点。路由节点负责存储和转发采集节点采集的数据，并将控制指令转发给控制节点。采集节点和控制节点由 ZigBee 通信模块和特定的传感器组成，负责采集和控制温室内的环境参数（包括温湿度、CO₂ 浓度和光照强度等）。ZigBee 网关是温室监控无线网络的核心，由 ZigBee 协调器和 STM32 微控制器两部分组成，负责建立和维护无线网络，接收采集节点发送的数据，将数据格式转换之后发送至上位机数据监控中心，同时将上位机数据监控中心发送的指令转发给终端节点。

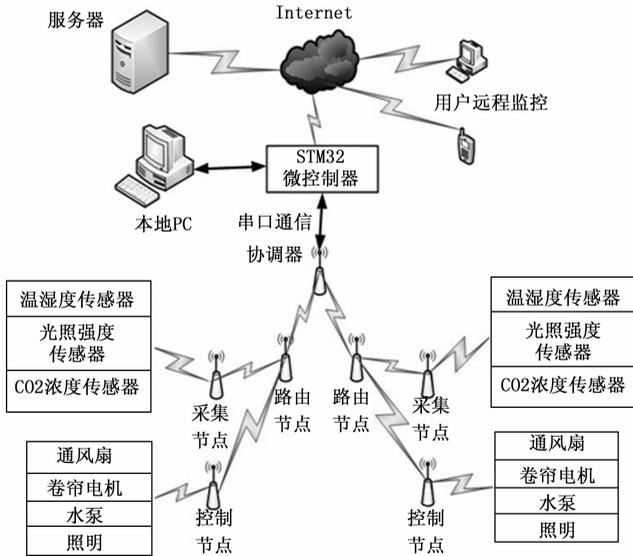


图 5 温室监控无线网络架构

ZigBee 网关由 ZigBee 协调器和 STM32 微型控制器组成。STM32 微控制器选用 ALIENTEK 战舰 STM32 F103 开发板，以 ARM Cortex-M3 为内核，CPU 工作频率最高可达 72 MHz，板载十多种标准接口和丰富的片上资源，板载的 DM9000 网络接口芯片通过 1 个 100 M 以太网接口（RJ45）实现连接互联网和数据的远程传输功能。ZigBee 协调器选择 CC2530 芯片，它是一种支持 IEEE802.15.4、ZigBee 和 RF4CE 应用的片上系统（SOC）解决方案，具有无线射频模块，集成 RF 收发器功能，是一种增强型的

8051CPU，能够以极低的功耗和极低的成本建立起强大的无线传感器网络^[14-15]。ZigBee 网关硬件结构如图 6 所示。

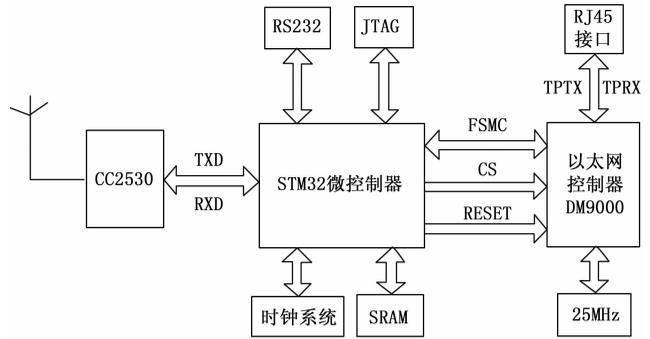


图 6 ZigBee 网关硬件结构

3.2 软件设计

软件设计部分需要对温室监控无线网络中的 3 种 ZigBee 节点的通信模块移植 Z-stack 协议栈，它是 TI 公司推出的 ZigBee 无线通讯协议，定义了 OSAL 操作系统并管理和调度 ZigBee 网络中各层定义的协议，并提供 API 接口函数，方便用户调用。根据 Z-stack 协议栈分别为协调器节点、终端节点和路由节点设计程序。

ZigBee 网关是连接上位机数据监控中心和监控终端的桥梁。它既要保证节点正常工作，也要建立起与上位机数据监控中心的通信功能。ZigBee 网关在建立网络并处理完入网请求后，检查是否接收到指令数据和采集节点传回的环境数据并对指令及时作出响应，ZigBee 网关软件流程如图 7 所示。路由节点在运行过程中只负责进行数据和控制指令的存储和转发。路由器节点在上电初始化后，检测是否有新节点加入网络，接收终端节点发送的数据并将其转发至 ZigBee 网关，同时将 ZigBee 网关发送的控制指令转发至终端节点。终端节点包括采集节点和控制节点，采集节点将定时采集到的环境数据发往 ZigBee 网关，控制节点接收到控制指令后，解析指令并运行相应的控制设备。终端节点采取休眠—唤醒的机制，唤醒期间节点接收指令并执

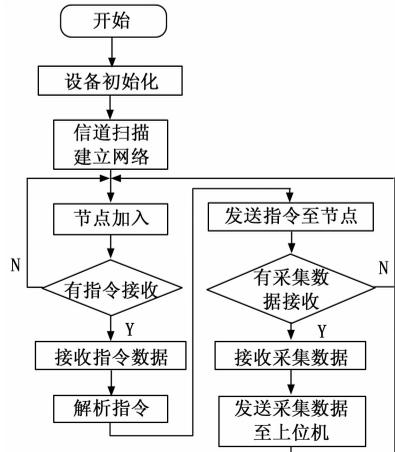


图 7 ZigBee 网关软件流程

行相应的采集和控制操作。终端节点的休眠时间可结合实际情况调节, 终端节点程序流程图如图 8 所示。

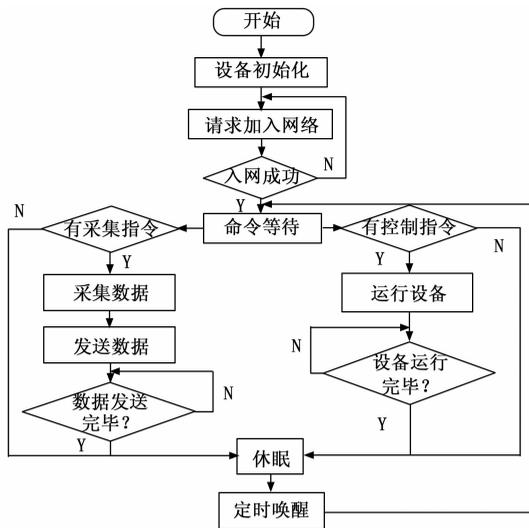


图 8 终端节点软件流程

4 结束语

本文提出了一种优化的 ZigBee 路由算法并将其应用在温室监控无线网络中。改进的算法通过控制 RREQ 分组的广播范围和广播方向, 选择节点剩余能量和 LQI 值较优的节点广播, 从仿真图像中可以看出, 优化的算法有效地降低了 ZigBee 网络的能耗, 提高了 ZigBee 网络的运行时间。改进的 ZigBee 路由算法成功应用于温室监控无线网络中, 该改进算法和监控无线网络也可以在相关领域中应用。

参考文献:

[1] 唐 道, 陈光化, 戴庆华, 等. 基于 WSN 的水产养殖环境监测系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2018, 26 (10): 9-13.

[2] 崔艳茹. 基于 ZigBee 技术的环境监测系统设计与研究 [J]. 通讯世界, 2018 (10): 268-269.

[3] 潘 琳. 基于 ZigBee 技术的温室大棚环境参数远程监测 [J]. 时代农机, 2018, 45 (11): 232-233.

[4] 龚尚福, 潘 虹. 智能温室大棚监控系统的设计 [J]. 现代电子技术, 2017, 40 (19): 119-122.

[5] 刘 杰, 李修权, 张 鑫, 等. 基于无线传感的智能温室监控系统设计 [J]. 中国农机化学报, 2019, 40 (4): 190-194.

[6] 毛 宁. ZigBee 路由算法的优化研究 [D]. 长春工业大学, 2015.

[7] Li Y R, Shi H B, Tang B Y. Address assignment and routing protocol for large-scale uneven wireless sensor networks [A]. CNMT 2009. International Symposium on Computer Network and Multimedia Technology, 2009 [C]. 2009.

[8] 李鹏翔. ZigBee 网络分布式地址分配算法研究 [D]. 重庆: 重庆邮电大学, 2012.

[9] 黎 寰. ZigBee 组网技术研究 [D]. 广州: 广东工业大学, 2017.

[10] 由文凯. 基于 ZigBee 的无线传感器网络路由协议的研究 [D]. 南京: 南京邮电大学, 2012.

[11] 谢 川. 基于 ZigBee 的 AODVjr 算法研究 [J]. 计算机工程, 2011, 37 (10): 87-89.

[12] 刘 丹, 钱志鸿, 刘 影. ZigBee 网络树路由改进算法 [J]. 吉林大学学报 (工学版), 2010, 40 (5): 1392-1396.

[13] 常赞杰, 张位勇, 李桂香. 一种基于邻居表的 ZigBee 树路由综合加权改进算法 [J]. 计算机与数字工程, 2018, 46 (3): 528-532.

[14] 杨运乐. 传感器技术在农业中的应用 [J]. 农业技术与装备, 2019 (2): 18-20.

[15] 许 东, 操文元, 孙 茜. 基于 CC2530 的环境监测无线传感器网络节点设计 [J]. 计算机应用, 2013, 33 (s2): 17-20, 24.

[16] 刁智华, 刁春迎, 袁万宾, 等. 基于改进型模糊边缘检测的小麦病斑阈值分割算法 [J]. 农业工程学报, 2018, 34 (10): 155-160.

[17] 宋 燕, 范之国, 王大千, 等. 利用大气偏振模式“∞”字形特征获取太阳位置的方法研究 [J]. 仪器仪表学报, 2018, 39 (5): 48-56.

[18] 王 宇, 陈海涛, 李海川. 基于引力搜索算法的植保无人机三维路径规划方法 [J]. 农业机械学报, 2018, 49 (2): 28-33, 21.

[19] 唐 立, 郝 鹏, 张学军. 基于改进蚁群算法的山区无人机路径规划方法 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2019, 19 (1): 158-164.

[20] 刘教民, 郭剑威, 师 硕. 自适应模板更新和目标重定位的相关滤波器跟踪 [J]. 光学精密工程, 2018, 26 (8): 270-281.

[21] 任晓玲, 陈亚娟, 刘 敬, 等. 超声监测在新生儿经皮外周静脉置入中心静脉导管尖端定位中的应用 [J]. 中华实用儿科临床杂志, 2019, 34 (18): 1398-1401.

(上接第 90 页)

[7] 黄辉先, 韩建超, 刘湘宁, 等. 逆变器驱动电机系统共模电压抑制模型预测控制 [J]. 电机与控制学报, 2018, 22 (9): 88-94.

[8] 史 兵, 段锁林, 李 菊, 等. 基于无线传感器网络的室内移动灭火机器人系统设计 [J]. 计算机应用, 2018, 38 (1): 290-295.

[9] 蔡雨婷, 陈昭炯, 叶东毅. 基于双层级联 GAN 的草图到真实感图像的异质转换 [J]. 模式识别与人工智能, 2018, 31 (10): 11-20.

[10] 李 康, 杨玉东. 基于改进的 Chan-Vese 模型与边缘转换的图像分割算法 [J]. 计算机工程与应用, 2019, 55 (6): 210-214.

[11] 刘会攀, 刘 林, 张 伟, 等. 骨样骨瘤全身骨显像和 SPECT/CT 显像的图像特征分析 [J]. 中华核医学与分子影像杂志, 2020, 40 (1): 11-15.

[12] 王 胜, 解 辉, 张福泉. 利用边缘检测与 Zernike 矩的半脆弱图像水印算法 [J]. 计算机科学与探索, 2018, 12 (4):

[13] 刁智华, 刁春迎, 袁万宾, 等. 基于改进型模糊边缘检测的小麦病斑阈值分割算法 [J]. 农业工程学报, 2018, 34 (10): 155-160.

[14] 宋 燕, 范之国, 王大千, 等. 利用大气偏振模式“∞”字形特征获取太阳位置的方法研究 [J]. 仪器仪表学报, 2018, 39 (5): 48-56.

[15] 王 宇, 陈海涛, 李海川. 基于引力搜索算法的植保无人机三维路径规划方法 [J]. 农业机械学报, 2018, 49 (2): 28-33, 21.

[16] 唐 立, 郝 鹏, 张学军. 基于改进蚁群算法的山区无人机路径规划方法 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2019, 19 (1): 158-164.

[17] 刘教民, 郭剑威, 师 硕. 自适应模板更新和目标重定位的相关滤波器跟踪 [J]. 光学精密工程, 2018, 26 (8): 270-281.

[18] 任晓玲, 陈亚娟, 刘 敬, 等. 超声监测在新生儿经皮外周静脉置入中心静脉导管尖端定位中的应用 [J]. 中华实用儿科临床杂志, 2019, 34 (18): 1398-1401.