

# 温室动态星型无线传感器网络通信方法研究

张荣标, 冯友兵, 沈卓, 郭建光, 连承飞

(江苏大学电气信息工程学院, 镇江 212013)

**摘要:** 针对温室测控系统信息传输技术存在的一些问题, 根据温室结构特征提出一种动态星型无线传感器网络的框架, 从低成本低功耗角度出发, 移动的汇聚节点采用定时跳频方法与子节点形成子网, 以尽量缩短点对点之间的通信距离。利用帧扩展的方法实现了以低功耗芯片 nRF2401A 构成复杂的通信网络, 并给出了传感器节点、控制节点和汇聚节点的通信算法。在汇聚节点不同的工作状态下, 对网络子节点进行能耗分析, 结果表明, 动态星型无线传感器网络的通信方法具有很好的节能效果, 对温室中数据的传输是有效的。

**关键词:** 无线传感器网络, nRF2401A, 温室, 通信算法

**中图分类号:** S625, TN92

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-6819(2008)-12-0107-04

张荣标, 冯友兵, 沈卓, 等. 温室动态星型无线传感器网络通信方法研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(12): 107-110.  
Zhang Rongbiao, Feng Youbing, Shen Zhuo, et al. Communication method of star wireless sensor network for greenhouse dynamic measurement[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(12): 107-110.(in Chinese with English abstract)

## 0 引言

目前, 温室环境测控系统通信方式主要有以下几种, 基于485总线<sup>[1]</sup>、CAN总线<sup>[2]</sup>或以太网<sup>[3]</sup>的有线通信方式, 基于蓝牙<sup>[4]</sup>或ZigBee协议<sup>[5-7]</sup>的短距离无线通信方式, 基于GPRS<sup>[8]</sup>或GSM<sup>[9,10]</sup>的远距离无线通信方式。有线通信方式使得温室内的信号线、动力线错综复杂, 恶劣的温室环境易导致线缆老化, 系统可靠性降低, 安装维护难度大。无线通信方式无需布线、组网灵活、易升级, 无线通信设备可在网络覆盖范围内随意移动和重新组网, 相对有线通信方式具有明显的优势。但目前在温室中使用的无线通信方式存在一定的局限性, 如蓝牙传输距离短、设备成本高、功耗大, 不适合大型传感器网络应用<sup>[11]</sup>; ZigBee通信模块初始成本在6美元左右<sup>[11]</sup>, 成本相对较高; GPRS和GSM利用付费的电信网络, 频繁的通信增加了系统的使用成本。

利用无线传感器网络实现数据传输是解决温室环境测控系统通信问题的有效方法<sup>[12]</sup>, 而由电池供电的传感器节点一旦能量耗尽将无法工作, 因此能量有限的电池制约着无线传感器网络的应用, 延长电池使用寿命是设计传感器网络需解决的一个关键问题。通过对温室动态星型无线传感器网络组网方式的探讨, 采用低成本低功耗的无线收发芯片nRF2401A实现了一种短距离动态自组织网络, 有效减少了节点电池能耗。

## 1 网络结构与组网关键技术

### 1.1 系统结构及其工作原理

无线温室测控系统主要包括监控中心、可移动汇聚节点和传感器(控制)节点三部分。可移动汇聚节点在温室顶部固定轨道上往复匀速移动, 采用直流电源持续供电。传感器(控制)节点位于汇聚节点的下方, 与可移动汇聚节点构成动态星型网络。传感器节点采用电池供电, 控制节点采用直流电源持续供电。系统的通信部分含有两层网络结构(如图1所示), 由若干同构的二级子网组成一级子网, 二级子网是由相同的汇聚节点所管辖的具有相同通信频率的传感器节点和控制节点组成。

部署在不同二级子网的传感器节点通信频率是不同的, 汇聚节点在移动过程中通过跳频依次与相应通信频率的传感器和控制节点形成二级子网。二级子网是一种动态星型网络, 在通信过程中传感器节点分时与汇聚节点通信, 在保证不丢失任何传感器节点信息的前提下, 合理安排各传感器节点的通信时间。汇聚节点与监控中心的通信采用多跳方式实现。

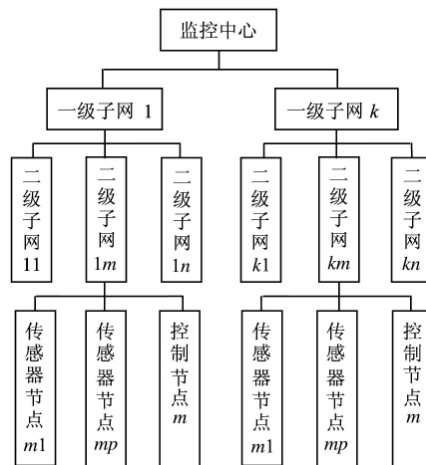


图1 温室测控系统结构框图

Fig.1 Structural diagram of measuring and controlling system for greenhouses

收稿日期: 2007-11-25 修订日期: 2008-08-16

基金项目: 国家“863”计划资助项目(2006AA10Z258)

作者简介: 张荣标(1957—), 男, 江苏海门人, 教授, 博士生导师, 主要从事智能检测与信息传输技术的研究。镇江市学府路301号 江苏大学电气信息工程学院自动化系, 212013。Email: zrb@ujs.edu.cn

## 1.2 组网关键技术

### 1.2.1 系统通信频率

设温室长为  $a$ ，宽为  $b$ ，一级子网数量为  $k_1$ 、一个一级子网下的二级子网数量为  $k_2$ ，则得到如下参数：

$$d_1 = a / k_1 \quad (1)$$

$$d_2 = a / (k_1 * k_2) \quad (2)$$

式中  $d_1$ 、 $d_2$ ——分别为一级子网、二级子网覆盖温室的跨度。

如图2所示，一级子网  $i$  内汇聚节点与各二级子网传感器节点数据帧、控制帧通信频率沿轨道方向分别为  $f(i)$ 、 $f(i+1) \cdots f(i+k_2-1)$ 。传感器节点第一信道用于数据帧、控制帧通信，第二信道用于信标帧通信。由于 nRF2401A 第二信道工作频率总是比第一信道大 8M，各二级子网信标帧通信频率沿轨道方向分别为  $f(i)+8$ 、 $f(i+1)+8 \cdots f(i+k_2-1)+8$ 。

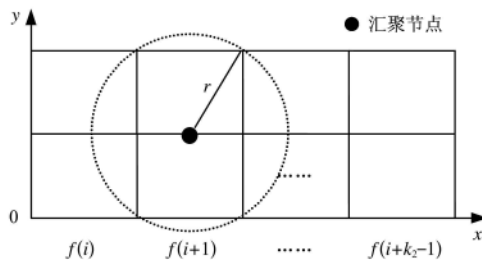


图2 一级子网平面示意图

Fig.2 Ichnography of first-level subnet

任意传感器节点在一级子网  $i$  内的平面位置坐标为  $(x, y)$ ，此时传感器节点工作频率如下：

$$f(i) = 2400 + i \quad (3)$$

$$f_1(x) = f(i) + \text{int}(x / d_2) \quad (4)$$

$$f_2(x) = f_1(x) + 8 \quad (5)$$

式中  $\text{int}()$ ——下取整函数； $f_1(x)$ ——传感器节点第一信道工作频率； $f_2(x)$ ——传感器节点第二信道工作频率。

系统通信频率的部署避免了同频节点的信道持续监听，有效解决了相邻二级子网传感器节点因连续多次唤醒消耗过多能量而过早失效的问题，实现了传感器节点能量的均匀消耗。

### 1.2.2 汇聚节点发射半径的确定

汇聚节点在二级子网内移动过程中动态组网，确保覆盖所在二级子网全部传感器节点。此时汇聚节点发射半径  $d'$  应满足如下条件：

$$d' = \sqrt{r^2 + h^2} \quad (6)$$

式中  $h$ ——汇聚节点与地面的垂直高度； $r$ ——汇聚节点在地面上的覆盖半径，其取值范围为：

$$\sqrt{d_2^2 + (\frac{b}{2})^2} < r < \sqrt{(2d_2)^2 + (\frac{b}{2})^2}。$$

## 2 帧结构设计

nRF2401A 只有一种基本帧结构，为满足温室测控系统的无线通信要求，有必要进行帧结构扩展设计实现网络的通信功能。nRF2401A 基本帧结构包括帧头、目的地址、数据和 CRC 校验 4 个部分。根据课题需要，设计 4 种类型的帧：数据帧、控制帧、信标帧和确认帧。数据帧和控制帧的结构详见表 1，其中源地址段、AD 段/控制段和帧类型对应基本帧的数据段。信标帧和确认帧的结构详见表 2，其中保留、帧类型对应基本帧的数据段。源地址段为发送节点地址；AD 段、控制段分别为传感器节点采集的温室环境参数值、监控中心驱动执行机构的参数值；帧类型定义为：00 为确认帧，01 为信标帧，10 为数据帧，11 为控制帧。

表 1 数据帧/控制帧

Table 1 Data frame/control frame

帧组成	位数
帧头	8 位
目的地址段	12 位
源地址段	12 位
AD 段/控制段	10 位
帧类型	2 位
CRC	8 位

表 2 确认帧/信标帧

Table 2 Acknowledgement frame/beacon frame

帧组成	位数
帧头	8 位
目的地址段	12 位
保留	22 位
帧类型	2 位
CRC	8 位

## 3 通信算法

温室测控系统通信主要包括移动汇聚节点与传感器和控制节点的通信以及汇聚节点之间的通信。汇聚节点在轨道上往复移动时依次与所管辖的各二级子网传感器节点通信。在二级子网内通信的过程中，汇聚节点向传感器节点广播信标帧，实现网内节点的时间同步。传感器节点在收到信标帧后开始定时，定时时间根据节点的地址计算确定，当传感器节点定时时间结束时，便与汇聚节点进行数据通信。控制节点在收到信标帧后，向汇聚节点发送必要的组网信息。现以一级子网  $k_1'$  为例，说明汇聚节点、传感器节点及控制节点的通信算法。

汇聚节点通信算法：

1) 初始化有关参数；

2) 设置第一信道工作频率为  $f(k_1' + k_2') + 8$ ，向所在二级子网的传感器节点广播信标帧，然后设置第一信道工作频率为  $f(k_1' + k_2')$ ，开始定时；

3) 接收帧并判断是否为控制帧，若是，则将其一级子网地址等于  $k_1'$  的控制帧在汇聚节点运行到相应二级子

网时向控制节点发送并接收确认帧, 将不等于  $k_1'$  的控制帧立即向一级子网  $k_1'-1$  的汇聚节点发送并接收确认帧, 跳到第 7) 步, 否则跳到下一步;

4) 判断接收到的数据帧源地址是否为一级子网  $k_1'-1$  的汇聚节点, 若是, 则向其返回确认帧, 将接收数据信息以数据帧形式发给一级子网  $k_1'+1$  的汇聚节点并接收确认帧, 跳到第 7) 步, 否则跳到下一步;

5) 判断接收到的数据帧源地址是否为传感器节点, 若是, 则记录传感器节点数据帧信息并返回确认帧, 跳到第 7) 步, 否则跳到下一步;

6) 将接收到的控制节点组网信息以数据帧形式发给一级子网  $k_1'+1$  的汇聚节点并接收其确认帧;

7) 重复 3) ~ 6) 步, 直到定时时间  $T$  到, 融合来自二级子网内所有传感器节点的数据信息, 将其封装成数据包后, 分别向一级子网  $k_1'+1$  汇聚节点发送并接收其确认帧;

8) 正向移动时, 若  $k_2'$  等于  $k_2-1$ , 则反向移动并跳到第 9) 步, 否则  $k_2'++$ , 并重复第 2) ~ 8) 步;

9) 反向移动时, 若  $k_2'$  等于 0, 则正向移动并跳到第 8) 步, 否则  $k_2'-$ , 并重复第 2) ~ 7)、9) 步。

传感器节点通信算法:

1) 设置第一、第二信道工作频率;  
2) 接收到汇聚节点信标帧, 开始定时;  
3) 采集并记录温室环境信息;  
4) 等待定时时间到来, 发送带有温室环境信息的数据帧;

5) 判断在规定时间内是否收到确认帧? 若未收到确认帧, 则继续发送数据帧, 时间到或收到确认帧就进入休眠状态。

控制节点通信算法:

1) 设置第一、第二信道工作频率;  
2) 当接收到汇聚节点信标帧时, 发送组网信息的数据帧;

3) 判断在规定时间内是否收到确认帧? 若未收到确认帧, 则继续发送, 时间到或收到确认帧就进入接收状态。

4) 当接收到汇聚节点控制帧时, 发送确认帧, 并进入接收状态。

#### 4 试验分析

由汇聚节点、传感器节点和控制节点组成的无线传感器网络实现温室测控系统的通信。由于传感器节点由电池供电, 电池寿命有限, 而电池更换很不方便, 因此传感器节点的低功耗成为温室测控系统长期稳定运行的关键。传感器节点的能耗主要集中在数据收发上<sup>[13]</sup>, 其中发送能耗与数据长度和通信距离密切相关, 而接收能耗与数据长度相关<sup>[14]</sup>。

为验证本文所述方法的能量有效性, 在某区域内进行了模拟试验, 主要对汇聚节点固定、无二级子网和网

络分为两个一级子网、汇聚节点移动形成二级子网这两种组网方式下的节点收发能耗进行比较。

试验在一个长 60 m、宽 8 m 的区域中进行, 布置了 14 个温度传感器节点, 2 个汇聚节点, 节点通信波特率为 1 Mbps。为便于节点部署, 传感器节点同构。

在两种组网方法下, 分别进行了数据收发能耗测试, 结果发现各节点的接收功率都在 50.432 mW 上下波动, 非常接近, 而发射功率却相差较大。表 3 是发送一组数据时两种组网方式的节点发射功率和温度数据。为获取较准确的发射功率, 试验中各节点在采集数据后, 向汇聚节点发送三次数据并测量发射功率, 取平均值作为发射功率。

表 3 某周期各节点发射功率

Table 3 Node's emissive power in a period

节点	汇聚节点固定		汇聚节点移动	
	温度/℃	发射功率/mW	温度/℃	发射功率/mW
1	23.7	28.419	23.8	27.127
2	23.4	28.427	23.2	27.149
3	23.1	32.736	22.9	27.134
4	22.9	32.771	23.1	27.141
5	23.5	32.763	23.6	27.136
6	24.1	37.375	23.8	27.129
7	23.8	37.378	23.7	27.142
8	23.9	28.417	23.2	27.133
9	23.7	28.423	23.3	27.139
10	24.2	32.766	23.9	27.135
11	23.7	32.769	24.3	27.128
12	23.7	32.773	24.0	27.137
13	23.3	37.378	23.4	27.136
14	23.4	37.381	23.6	27.141

试验表明通过网络采集的温度与现场实测数据吻合, 在数据有效传输的情况下, 从表中可以看出, 汇聚节点固定时, 距离远的节点发射功率高于距离近的节点发射功率, 节点能耗不均匀; 而汇聚节点移动时, 由于节点只在与汇聚节点构成星型网络时才发送数据, 因此发射功率比较小, 而且节点能耗均匀。

采用移动汇聚节点形成二级子网的组网方式平均每个周期比汇聚节点固定的组网方式减少能耗为

$$\begin{aligned}\Delta E &= (32.841 - 27.136) \times 52 / 1000000 \times 14 \\ &= 4.15324 \times 10^{-3} (\text{J})\end{aligned}$$

显然, 随着传感器网络的持续工作, 数据量增加, 采用移动汇聚节点形成二级子网的组网方式将节约更多的能量。

#### 5 结 语

传感器节点能量有限使得节点使用寿命有限, 而电池的频繁更换给温室无线传感器网络测控系统的应用带来不便, 严重制约着其推广应用。论文以节约节点能耗为目的, 根据温室的特点, 从组网方式入手, 对节能技术做了深入研究, 大大节约了节点能耗, 延长了电池更换周期。与现有温室无线传感器网络测控系统<sup>[12, 15, 16]</sup>相

比, 由移动汇聚节点形成二级子网的组网方式提高了组网的灵活性, 有利于延长电池供电的传感器节点使用寿命, 满足温室作物生长期的需求。然而随着新器件的不断出现, 方法的不断创新, 实现更低能耗的组网方式有待于进一步探索。

#### [参 考 文 献]

- [1] 杨卫中, 王一鸣, 李海健. 基于现场总线思想的分布式温室智能控制系统[J]. 农业工程学报, 2006, 22(9): 163—167.
- [2] 徐 津, 杜尚丰, 赵兴炳, 等. 基于CAN总线的温室智能控制节点的开发[J]. 仪器仪表学报, 2004, 25(4)增刊: 522—523.
- [3] 陈建恩, 王立人, 苗香雯. 温室数据采集系统远程通信接口设计研究[J]. 农业工程学报, 2003, 19(4): 259—263.
- [4] 柳桂国, 应义斌. 蓝牙技术在温室环境检测与控制系统中的应用[J]. 浙江大学学报, 2003, 29(3): 329—334.
- [5] 张西良, 丁 飞, 张世庆, 等. 温室环境无线数据采集系统的研究[J]. 中国农村水利水电, 2007, (2): 8—13.
- [6] 包长春, 石瑞珍, 马玉泉, 等. 基于ZigBee技术的农业设施测控系统的设计[J]. 农业工程学报, 2007, 23(8): 160—164.
- [7] 刁智华, 陈立平, 吴 刚, 等. 设施环境无线监控系统的设计与实现[J]. 农业工程学报, 2008, 24(7): 146—150.
- [8] 孙忠富, 曹洪太, 李洪亮, 等. 基于GPRS和WEB的温室环境信息采集系统的实现[J]. 农业工程学报, 2006, 22(6): 131—134.
- [9] 周国祥, 周 俊, 苗玉彬, 等. 基于GSM 的数字农业远程监控系统研究与应用[J]. 农业工程学报, 2005, 21(6): 87—91.
- [10] 句荣辉, 沈佐锐. 基于短信息的温室生态健康呼叫系统[J]. 农业工程学报, 2004, 20(3): 226—268.
- [11] 李 莉, 张彦娥, 汪懋华, 等. 现代通信技术在温室中的应用[J]. 农业机械学报, 2007, 38 (2): 195—200.
- [12] Liu Hui, Meng Zhijun, Cui Shuanghu. A Wireless sensor network prototype for environmental monitoring in greenhouses[A]. Wireless Communications, Networking and Mobile Computing[C], 2007: 2344—2347.
- [13] 孙利民, 李建中, 陈 渝, 等. 无线传感器网络[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [14] Heinzelman W, Chandrakasan A, Balakrishnan H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2002, 1(4): 660—670.
- [15] Li Xiuhong, Sun Zhongfu, Huang Tianshu, et al. Embedded wireless network control system an application of remote monitoring system for greenhouse environment[A]. Computational Engineering in Systems Applications[C], IMACS Multiconference, 2006: 1719—1722.
- [16] Narasimhan V L, Arvind A A, Bever K. Greenhouse asset management using wireless sensor-actor networks[C]. Mobile Ubiquitous Computing, Systems, Services and Technologies, 2007: 9—14.

## Communication method of star wireless sensor network for greenhouse dynamic measurement

Zhang Rongbiao, Feng Youbing, Shen Zhuo, Guo Jianguang, Lian Chengfei

(School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

**Abstract:** Regarding problems of information transmission technology for greenhouse measuring and controlling system, a dynamic star wireless sensor network was proposed according to greenhouse structure. In view of cost-effective and low energy consumption, frequency hopping timing methods were combined with sub-nodes to form sub network for mobile aggregation node, which reduces point-to-point traffic span as much as possible. Using frame extension method, complex communication network was achieved based on the low energy consumption chip, nRF2401A. Communication algorithm is introduced for sensor nodes, control nodes and aggregation nodes. Energy consumption of sub-nodes within network was analyzed under different working conditions of aggregation nodes. Research results indicate that communication method of dynamic star wireless sensor network saves energy effectively, and data transmission is effective.

**Key words:** wireless sensor network, nRF2401A, greenhouses, communication algorithms