

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2018.05.011

ZigBee 无线通信方案在多自由度机械手控制系统中的应用研究

付凯升, 张乐年*

(南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016)

摘要:针对 LAMOST 望远镜拆装机械手的自由度多、运动复杂且工作空间狭小, 不便于使用传统的线缆通信实现该机械手控制的问题, 对基于 ZigBee 的无线通信的控制系统进行了研究, 并设计了相应的通信系统。对通信系统的通信误码率对通信成功率的影响、系统对时延的要求和距离与遮挡对稳定性的影响等问题进行了归纳分析; 提出了采用应答和错误重发机制来提高系统通信成功率; 采用 CSMA-CA 介入和时分多址接入结合满足了通信系统不同的通信方向对时延的要求; 采用作为协调器的中心节点对消息进行路由以避免通信距离过大而导致的信号衰减, 并将其置于空中防遮挡来保证通信的稳定性的方案; 利用串口助手对该系统进行了通信成功率、通信稳定性和时延等方面的测试。测试结果表明: 该通信系统工作稳定、可靠性高, 通讯成功率达到了 99.99%, 且节点间的通信时延不到 100 ms。

关键词: LAMOST; ZigBee; 无线通信; 机械手

中图分类号: TH39; TP241.3; TN92

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2018)05-0501-06

ZigBee wireless communication scheme in multi DOF manipulator control system

FU Kai-sheng, ZHANG Le-nian

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Aiming that the manipulator has many degrees of freedom, complex motion and small working space and it is difficult to control the manipulator by traditional cable communication, experimental study on the control system of wireless communication based on ZigBee was carried out, and a communication system based on the study was designed. The communication error rate of the communication system influence on the success rate of the communication system, time delay requirements and distance and shielding effect on the stability issues were summarized and analyzed. The response and error retransmission mechanism was used to increase the success rate of communication system. CSMA-CA intervention and TDMA was adopted to meet the delay on different direction of communication. Central node was used as coordinator for message routing to avoid the attenuation of the signal due to long-distance communication and placed in the air to prevent signal was obstructed. The serial communication assistant was used to test the communication success rate, communication stability and delay of the system. The results show that communication system is stable and reliable, the success rate reached 99.99% and the delay less than 100 milliseconds.

Key words: LAMOST; ZigBee; wireless communication; manipulator

0 引言

LAMOST 望远镜是一个镜面由 37 个高度和角度

均不相同的对角线长度为 1.1 m 的六边形子镜组成的大型拼接望远镜。其中心位置距离地面约 10.11 m, 且与水平面成约 65° 夹角^[1]。该望远镜工作环境恶

收稿日期: 2017-09-18

作者简介: 付凯升(1991-), 男, 河北石家庄人, 硕士研究生, 主要从事机电一体化方面的研究。E-mail: FKS1991@126.com

通信联系人: 张乐年, 男, 副教授, 硕士生导师。E-mail: zln620514@163.com

劣,镜面需要定期进行维护和清理。但由于该镜面重量过大、造价过高、安装位置不易到达,所以不适合人工拆卸,因此需要专门设计一个用于镜面拆装的机械手。该机械手必须满足兼有大跨度、长距离和小位移以及高精度的工作特点。为此设计了一个多自由度的机械手来完成复杂而精准的动作^[2-5]。自由度的增加导致该机械手的驱动电机较多,因此控制该机械手运动所需的控制板也相应增加。此外,该机械手基座位于一个与水平面呈 45° 夹角的斜坡上,如果采用传统的线缆通信会给现场布线、设备运动和后期的维护增加困难。

为实现该机械手复杂而精准的运动,完成望远镜拆装的任务,本文将针对该系统中的无线网络通信系统的实现进行研究,并对相关性能进行试验验证。

1 总体设计方案

1.1 机械手系统总体方案设计

该机械手系统由工控机、遥控器、无线网络、控制柜和执行机构 5 部分组成。工控机部分为操作人员提供监测机械手状态和控制机械手完成任务的操作界面^[6]。遥控器部分作为工控机的一个补充,便于操作人员在便于观察的位置对机械手进行控制,无线网络则完成工控机和遥控器与控制柜以及机械手各机构的传感器与控制柜之间的通信。一方面实现工控机和遥控器与控制柜之间的通信,另一方面将机械手的传感器信息发送给工控机。控制柜通过下位机程序控制机械手完成指定动作并将机械手的实时状态反馈给工控机。执行机构在下位机的控制下完成指定动作,实现相应功能。为了防止出现意外情况而对机械手和望远镜造成损伤,该机械手系统还配有一个紧急停车按钮,该按钮通过系统物理断电来实现紧急停车。

系统整体结构如图 1 所示。

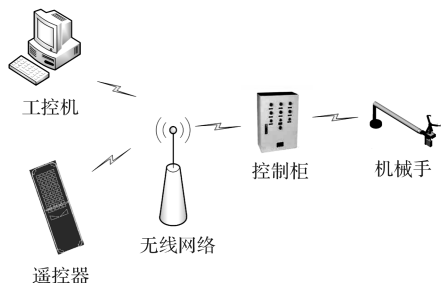


图 1 机械手系统结构图

该机械手的控制由操作者通过工控机上的操作界

面或手持遥控器来完成,为非周期控制。当机械手需要在某个方向上运动时,操作者会通过控制软件设置机械手相应部位的运动参数,然后等待机械手运动完成。

1.2 通信系统总体方案设计

该系统的无线通信系统主要由中心节点、控制板卡节点、传感器节点、工控机节点和遥控器节点组成。

中心节点作为整个网络的协调器,负责网络的创建和维护。控制板卡节点作为相应机构传感器的父节点,负责上下位机的通信和管理传感器节点并与其通信。一方面,控制板卡节点负责将工控机发送过来的指令通过串口发送给控制板卡,实现上位机对机械手运动的控制^[7];另一方面,控制板卡节点负责将控制板卡要发送给上位机的数据发送到工控机,实现上位机对机械手实时状态的监控。此外,控制板卡节点还需要接收来自传感器节点的报警信息,并将其转发给控制板卡进行处理。传感器节点则负责监测各个运动机构的位置是否在安全范围,并及时将报警信息发送给控制板卡节点。工控机节点主要负责将上位机发送过来的命令消息通过网络传输给相应的控制板卡节点,并接受来自控制板卡节点的消息。遥控器节点与工控机节点类似,负责将遥控器的控制信息通过中心节点转发给相应的控制板卡节点,但其不需要接收来自控制板卡节点的信息。其结构如图 2 所示。

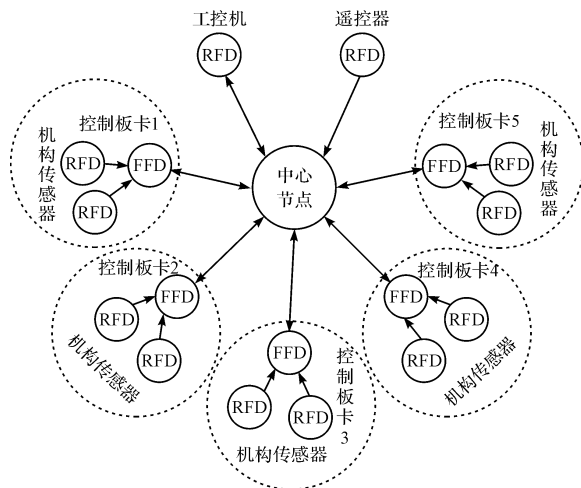


图 2 无线通信系统结构图

2 系统硬件设计

该设计中的无线通信系统采用的是基于 ZigBee 的无线网络通信系统。一般的 ZigBee 网络由协调器、路由器和终端节点组成。根据该系统的具体情况,此无线网络由作为协调器的中心节点、与其通信的控制

板卡节点与工控机节点和遥控器节点以及检测机构运动位置的机构传感器节点组成。

2.1 ZigBee 技术简介

ZigBee 是与组网、安全和应用软件有关的技术标准,能在数千个微型传感器之间协调通信,其通信效率非常高。ZigBee 常见的拓扑结构有 3 种,分别为星形拓扑结构、网状拓扑结构和树簇形拓扑结构。

星型网络结构的特点是只能实现协调器和终端节点之间的通信,该种网络结构的优点是结构简单、成本低。

树簇状结构成本低,而且覆盖的面积较大,能够实现“多跳”功能,缺点是任何一个节点的信息安全都会影响整个网络,网络的性能较差,不适合动态的环境。

网状结构具有自组织、自愈功能,而且适应环境能力强,具有较强的系统可靠性和网络的健壮性,缺点是路由模式不固定,瞬时网络的连接质量决定了网络传输的时间,网络更加复杂,功能也相应的增加^[8-10]。

ZigBee 网络拓扑结构示意图如图 3 所示。

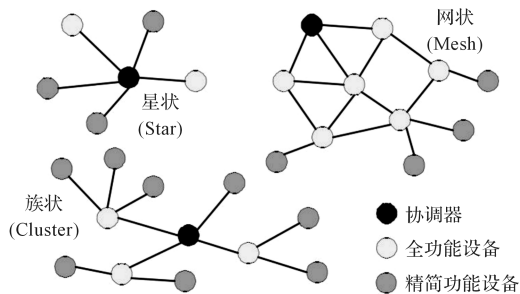


图3 ZigBee 网络拓扑结构示意图

2.2 ZigBee 无线网络设计

该通信系统所需的无线网络主要实现以下几个功能:(1)完成将上位机和遥控器的控制指令转发给控制柜;(2)完成将控制柜所获取的机械手运动过程中的实时状态发送给工控机;(3)完成将机械手各个运动机构的传感器信息发送到控制柜。该系统的传感器节点只需与其相关的控制板卡节点进行通信,所以传感器节点作为控制板卡节点的子节点加入网络。控制板卡需要同时与中心节点与传感器节点通信,故其作为路由器加入网络。控制柜和机械手只需要和控制板卡进行通信,故其可以作为终端设备,加入网络即可。综合考虑,本方案采用树簇形网络拓扑结构。

在该网络结构中,中心节点为协调器,该节点的作用是建立网络并配置网络的相关参数,提供给其他设备加入网络,此节点使用全功能设备(FFD)。5个控

制板卡所在的网络节点分为一个父节点和若干子节点。一方面,父节点接收工控机和遥控器发送过来的信息,然后交给控制板卡进行信息处理,并将控制板卡的反馈信息发送给工控机;另一方面,父节点还要接收来自机构传感器节点的信息。由于精简功能设备(RFD)只能与 FFD 设备进行通信,故控制板卡节点只能用 FFD。机构传感器节点只与相应的控制板卡进行通信,该节点均采用 RFD。工控机和遥控器只与控制板卡节点进行通信,且不需要对消息进行路由,所以这两个节点采用 RFD。

工控机或遥控器控制机械手运动时,工控机和遥控器发出的消息经过中心节点的路由转发给相应的控制板卡节点。控制板卡接收到命令消息后对消息解析并进行响应。机械手在运动过程中,控制板卡会周期性的将机械手的实时位置信息通过中心节点发送给上位机,以便操作者监测机械手的实时状态;同时机械手的传感器也会检测机械手的位置,并将报警信息发送给其父节点。

2.3 网络节点设计

该无线网络节点主要由 CC2530 模块、电源模块、复位电路和外围接口电路组成。CC2530 模块作为网络节点的核心,主要负责网络的建立和维护;其次,该模块负责将通过串口或传感器接口接收到的数据发送到目的节点,或者将从网络接收到的数据通过 RS232 串口发送给工控机或控制板卡;除了必要的供电电路和用于下载程序和调试的 JTAG 接口外,网络节点还有防止程序跑飞的复位电路。

网络节点整体结构如图 4 所示。

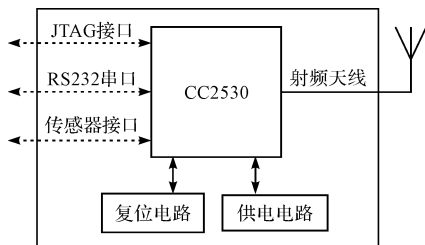


图4 网络节点结构图

CC2530 模块结合了德州仪器的 ZigBee 协议栈(Z-StackTM),具有自组网功能,在单个芯片上整合了 ZigBee 射频(RF)前端、内存和微控制器,微控制器使用 1 个 8 位增强型 MCU,具有 32/64/128/256 KB 可编程闪存和 8 KB 的 RAM。该芯片具有完全集成的压控振荡器,只需要天线、16 MHz 晶振等非常少的外围电路就能在 2.4 GHz 频段上工作,完全可以满足

IEEE802.15.4 标准和 ZigBee 技术标准的无线网络技术设计开发需要^[11]。

为了满足传感器和芯片的不同供电方案,该设计采用 24 V 直流供电,然后通过电压转换芯片 SPX1117-3.3 获得芯片所需的 3.3 V 电压。该网络节点采用了 SP706SEN 看门狗芯片来实现独立于单片机的复位电路。该设计中采用美信公司的 MAX232 芯片来实现串口通信所需的电平转换。该方案中采用了东芝公司(Toshiba)的 TLP521-4 光电耦合器件,实现不同供电系统的信号传递。

3 系统软件设计

3.1 协调器程序设计

协调器首先上电初始化,通过对指定信道或默认信道进行能量检测,以探测可能存在的网络或干扰;然后在已存在网络最少干扰最低的信道建立网络;成功建立网络之后进入监听模式,接受节点加入网络或进行消息路由。其程序流程如图 5 所示。

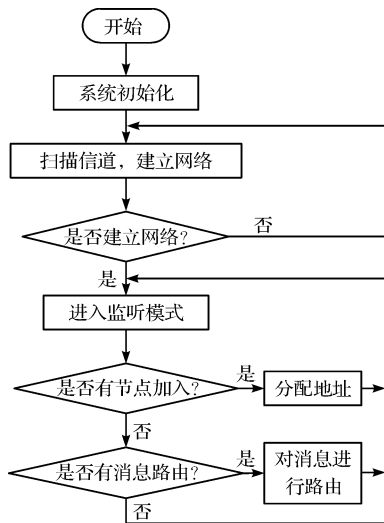


图 5 协调器程序流程图

3.2 控制板卡节点程序设计

控制板卡节点作为传感器节点的父节点,不仅需要自己加入网络,还需要允许其子节点通过它加入网络。该节点负责处理其子节点的入网请求并对其子节点进行管理。控制板卡节点不仅需要与协调器通信,接受来自协调器的信息并将控制板卡要发送的信息通过协调器转发到上位机,而且控制板卡节点还要接收其子节点的报警信息。故其程序流程为上电初始化系统加入网络,然后进入监听模式。在监听模式中,控制板卡节点会处理子节点加入网络的请求、接收和发送数据。其程序流程如图 6 所示。

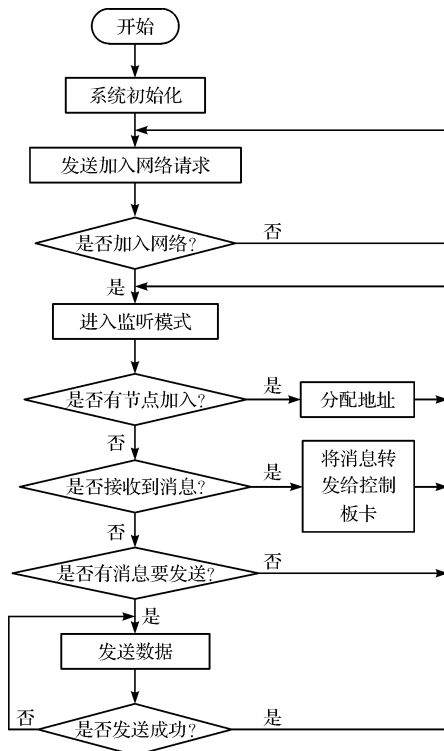


图 6 控制板卡节点程序流程图

3.3 传感器节点程序设计

传感器节点主要负责检测各运动机构的运动位置是否超出安全范围,并将报警信号发送给对应的控制板卡节点。每个 ZigBee 终端传感器拥有唯一的通信地址,根据此地址来判断是哪个机构的位置状态。当传感器接口接收到异常信息时将发送报警信号给控制板卡节点。传感器节点程序流程如图 7 所示。

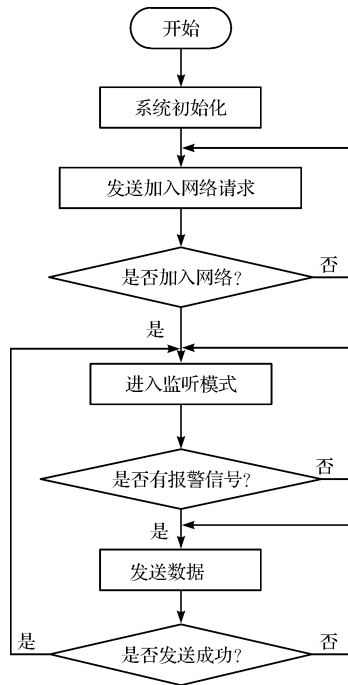


图 7 机构传感器节点程序流程图

3.4 通信方案设计

上下位机通信是一个主从通信的过程,通信由上位机发起,下位机接收到上位机的命令之后被动的进行回应。下位机接收到上位机的命令之后,根据通信协议对命令进行解析,然后做出响应。当上位机命令为状态查询指令时,下位机会将相应的状态进行一次反馈,如果上位机在规定时间内没有接收到下位机反馈的状态信息则会收到提示,由操作者决定是否让下位机重发。当上位机命令为运动控制指令时,下位机会以 1 Hz 的频率向上位机反馈当前运动机构的实时位置,以便操作者观察机构状态。其稳定回传的数据量为几十字节。

表 1 上位机命令数据包

位数	1	2	3	4	5	6	7	8-11	12-15	16	17
定义	包头	包长度	接收地址	命令码	电机号	方向	细分	圈数	频率	校验	包尾

表 2 下位机反馈数据包

位数	1	2	3	4	5	6	7-8	9-12	13	14	15
定义	包头	包长度	接收地址	命令码	板卡号	电机号	传感器信息	反馈信息	看门狗次数	校验	包尾

4 系统测试与工程实现

4.1 系统测试

笔者在实验室模拟系统结构搭建了一个相同的无线通信系统,使用电脑端的串口助手通过 RS232 串向节点发送数据,将目的节点与另一电脑串口相连,将接收到的数据在串口中显示。

远距离通信测试中,在无任何遮挡且通信成功率达 99% 时的远距离通信的范围为 80 m。上位机节点到下位机节点的通信时延不到 0.5 s。加上中间节点之后,在 150 m 以内的通信成功率可达 99%。测试结果如图 8 所示。

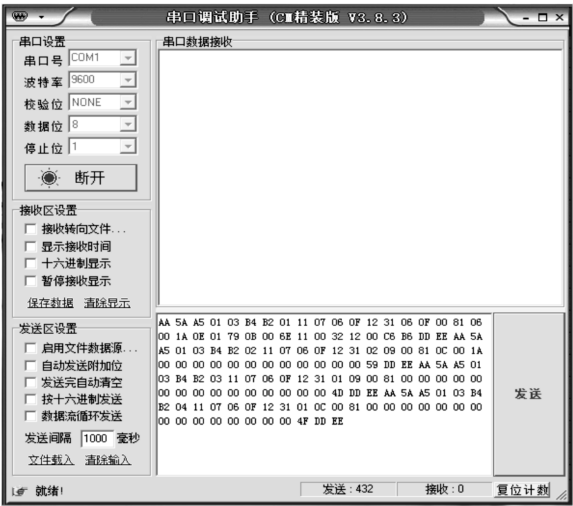
4.2 工程实现

原来的有线通信系统控制方式有几个突出问题:(1)由于线缆过多导致机械手运动不灵活;(2)经常性拖拽线缆使得线缆连接出现松动甚至脱落;(3)由于工作环境恶劣,长期工作于零下十几度的环境导致线缆变脆,出现机械手瘫痪;(4)由于结构复杂而导致现场布线过多,当出现问题时排查和维护难度大。

由于上位机命令的优先级高于下位机反馈的消息,要保证该方向上消息的传递在限定的时延内,故对时延有一定的要求。由工控机和手持遥控器发向下位机的消息是在超帧时期的非竞争接入时期采用时分多址接入方式发送,而下位机向上位机反馈的消息对时延要求不高,则在超帧时期的竞争接入时期来发送。

上、下位机之间的通信是以数据包的形式进行的,比较可靠的数据协议通常由以下几部分组成:包头、地址信息、数据长度、数据类型、数据块、校验码和包尾。本系统中针对上位机命令数据和下位机反馈数据设计了两种不同的数据格式。其各部分定义如表(1,2)所示。

经过现场安装调试,该通信方案在保证机械手正常运动的前提下通信稳定、成功率高达 99.99%。在工作人员的协同操作下,该机器人可以很好的完成 LAMOST 望远镜子镜的拆装工作。整套系统完成一块子镜的安装或拆卸过程大约需要 2 h。基本达到了拼接望远镜在整个维护周期内镜面均在只缺少一面子镜的情况下正常工作的理论装卸速度。与之前的拆装方法相比,本系统很好地完成了子镜拆装的任务。



(a) 发送节点串口助手截图

