

基于 AOA 算法的低功耗蓝牙室内定位系统

沈天盛¹, 陈文莹¹, 朱彬斌¹, 王燕¹, 周勇良¹, 梁奕²

(1. 国网上海市电力公司, 上海 200122; 2. 上海电力大学)

摘要: 设计了基于到达角度法(Angle of Arrival, AOA)的蓝牙定位系统,并搭建了基于 CC2652R1 蓝牙开发板和 STM32 单片机的低功耗蓝牙定位系统。现场测试实验结果表明,本系统能够在室内复杂环境下获取亚米级精度的定位信息,精度可达 20 cm,适用于电力智慧运维、智慧工厂、商城导引、仓储物流等场景。

关键词: AOA 定位;CC2652R1;室内定位;STM32

中图分类号: TP216.3

文献标识码: A

Low-power Bluetooth Indoor Positioning System Based on AOA Algorithm

Shen Tiansheng¹, Chen Wenying¹, Zhu Binbin¹, Wang Yan¹, Zhou Yongliang¹, Liang Yi²

(1. State Grid Shanghai Electric Power Company, Shanghai 200122, China; 2. Shanghai Electric Power University)

Abstract: In the paper, a Bluetooth positioning system based on Angle of Arrival (AOA) method is designed, and build a low-power Bluetooth positioning system based on CC2652R1 Bluetooth development board and STM32 microcontroller. The field test results show that this system can obtain sub-meter accuracy positioning information in indoor complex environment with accuracy up to 20 cm, which is suitable for scenarios such as electric power smart operation and maintenance, smart factory, shopping mall guidance, and warehouse logistics.

Keywords: AOA positioning; CC2652R1; indoor positioning; STM32

0 引言

随着科技快速发展,位置服务已经渗入社会生活的方方面面, GPS(Global Positioning System, 全球定位系统)定位服务可以提供路线规划、人员搜寻、车辆导航等便利^[1],但人类 80%左右的时间都是在室内度过。

目前常见的定位技术包括射频识别技术(RFID)、Zig-Bee 定位、普通蓝牙、无线局域网(Wireless Local Area Network, WLAN)、超宽带(Ultra Wide Band, UWB)、接收信号强度指示(Received Signal Strength Indicator, RSSI)指纹法^[2]。在复杂而多样的室内场景下,以上定位技术仍存在精度不高、实时性差的局限性^[3]。基于到达角度法的蓝牙定位技术引入了寻向功能,将蓝牙定位精度提升到亚米级别,同时具有功耗低、成本低、兼容性强等优势,在室内定位领域具有广阔前景。

1 蓝牙 AOA 定位技术介绍

蓝牙技术联盟在 2019 年发布了蓝牙 5.1 规范^[4],新增的寻向技术使得蓝牙设备可以获取信号的方向,进一步提高定位精度。寻向技术提供了两种确定信号方向的方法:

出发角(AOD)技术和到达角(AOA)技术^[5]。

AOA 定位技术主要由发射端和接收端组成,发射端只有单个天线,接收端由多天线阵列组成。首先发射端会通过 2.4 GHz 频率的载波信号对一段 CTE 信号进行广播,多天线阵列会在接收到信号后与发射端进行配对,随后接收端会控制自身的射频开关以切换不同的天线进行 I/Q 采样^[6],接收端的各个天线阵元的位置不同,从而产生相位差异,利用 I/Q 采样数据中存在的相位差关系计算出接收信号的到达角。

AOA 定位原理图如图 1 所示,入射波到达所有天线阵元的信号方向都可视为平行^[7],设所有天线阵元的距离

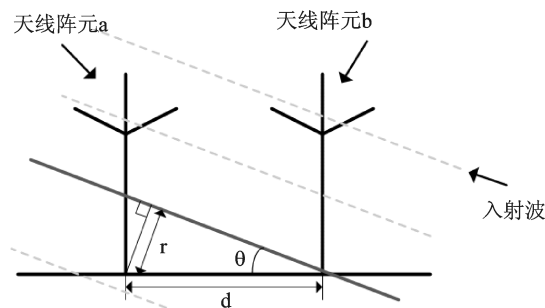


图 1 AOA 定位原理

都固定为 d , 入射波波长为 λ , I/Q 采样中测得相位差为 Φ , 对于垂线 r , 存在如下关系:

$$r = \frac{\lambda \varphi}{2\pi} = d \sin(\theta) \quad (1)$$

因为相邻天线阵元的相位差为恒定值, 可求得入射角 θ 为:

$$\theta = \arcsin\left(\frac{r}{d}\right) = \arcsin\left(\frac{\varphi \lambda}{2\pi d}\right) \quad (2)$$

2 系统组成

系统整体由 4 部分组成: 蓝牙基站、蓝牙标签、STM32 单片机和上位机软件。在 AOA 算法中需要两个或以上的角度才能得到目标的准确位置, 因此蓝牙基站和 STM32 单片机至少各需要两台。系统连接架构如图 2 所示。

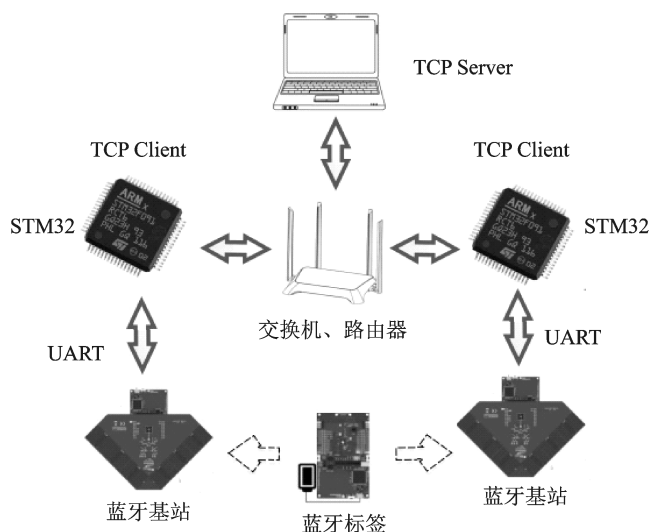


图 2 蓝牙定位系统架构图

蓝牙基站和蓝牙标签都使用 Texas Instrument(TI)公司的 CC2652R1 蓝牙开发板实现, 其中蓝牙基站上搭载了一块 BOOSTXL 天线板。蓝牙基站和 STM32 通过串口建立通信, 两部分共同组成下位机, 上位机为 PC 中运行的控制软件。STM32 通过以太网连接至路由器或交换机, PC 则可以通过 WiFi 或以太网的方式与下位机建立连接。整个系统部署简单、结构可靠。

系统开始运行后, PC 首先会建立 TCP 服务器, STM32 会以客户端的身份与 PC 进行连接。随后 STM32 通过串口对蓝牙基站进行一系列的配置, 配置的内容包括蓝牙标签地址、用于切换不同接收天线的恒定频率扩展信号(Constant Tone Extension, CTE)、CTE 持续时间、天线切换样式等数据。配置完成后, 蓝牙基站会与标签建立同步连接, 多天线蓝牙基站在 CTE 持续时间内循环切换天线顺序, 采样 I/Q 数据。采样后的 I/Q 数据将通过串口发送至 STM32 单片机, STM32 再通过网口转发采样数据至

上位机 PC 处进行一系列算法处理, 最后显示蓝牙标签的位置和运动轨迹。

3 系统硬件电路设计

3.1 蓝牙天线控制器电路

使用 TI 公司生产的 CC2652R 芯片作为蓝牙基站、标签的控制器。该芯片基于 Arm Cortex-M4F 内核, 能够以 48 MHz 的频率进行工作, 板载 8 KB SRAM 和 256 KB ROM。除了基本的 GPIO(General Purpose Input Output, 通用输入/输出)外, 还有 4 个 32 位通用计时器, 1 个 12 位 8 通道的 ADC(Analog to Digital Converter, 模/数转换器)等高性能外设, 在最大功率运行的情况下, 其工作电流仅为 3.4 mA。在无线通信部分, 该芯片具备与 IEEE 802.15.4 PHY 和 MAC 标准兼容的 2.4 GHz 射频收发器, 高达 +5 dBm 的输出功率^[12], 适用于符合各项全球射频规范的系统, 是一款优秀的蓝牙定位解决方案。

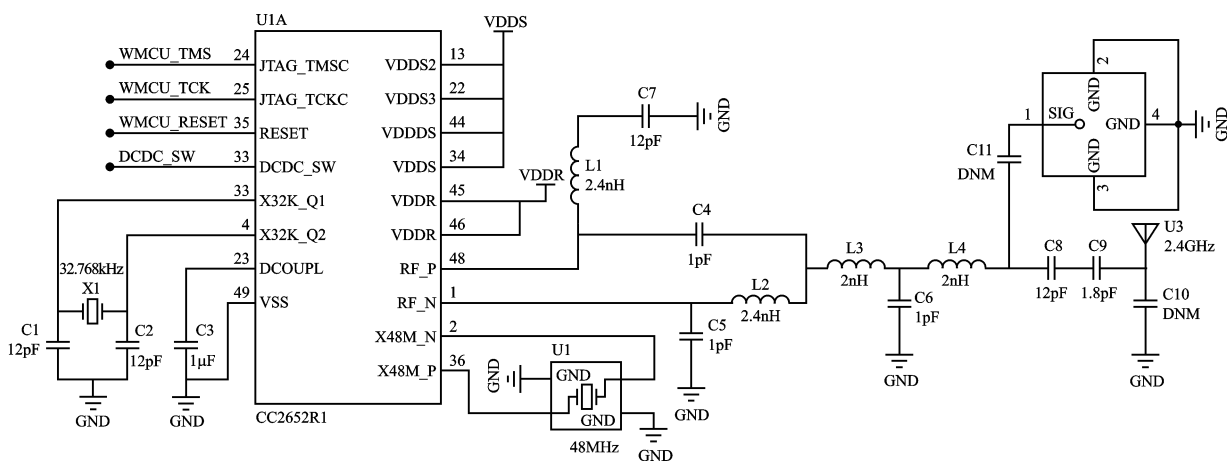
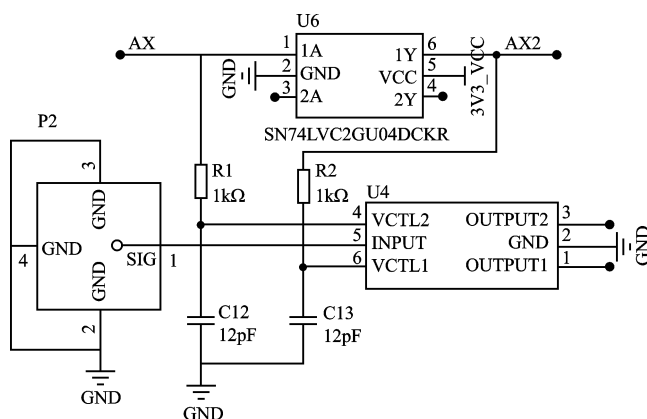
芯片射频天线部分的引脚分布如图 3 所示, 其中 RF_P、RF_N 作为 RF 输入信号的正负端连接至天线收发器。C9、C10 用于匹配 2.4 GHz 板载天线。C8、C11 用于耦合板载天线或 BOOSTXL 天线板, 当电路作为蓝牙标签使用时, 将 12 pF 电容焊接至 C8 处, C11 悬空; 当电路作为蓝牙基站使用时, 将 C8 处电容焊接至 C11 处, 并将 BOOSTXL 天线板接入 P1 的 IPEX 射频同轴连接器。RESET_N 作为复位功能引脚通过 WMCU_RESET 连接至复位按钮。X32K_Q1、X32K_Q2 以及 X48M_N、X48M_P 分别连接至 32.768 kHz 和 48 MHz 晶振电路。

3.2 蓝牙天线阵列切换电路

蓝牙天线阵列切换电路如图 4 所示。AOA 算法需要两个或以上的天线阵列测量相位差, 两个天线阵列的距离必须在 $\lambda/2$ 范围内。同时, 蓝牙 5.1 规范规定天线切换间隙必须在 $2 \mu s$ 内进行, 必须保证射频开关能够在指定的时隙内稳定运行。该部分电路采用了一款 GaAs 单刀双掷开关 SKY13323-378LF, 其工作频率范围为 0.1 Hz~3 GHz, 具有 0.35 dB 的极低插入损耗、高线性度、隔离效果好的特点。使用反相器 U6 快速切换控制信号, 利用 C12、C13 电容的充放电特性, 保证控制信号不受噪声干扰。

3.3 以太网通信电路

以太网通信电路如图 5 所示。LAN8720A 针对消费类电子和企业级应用而设计, 是一款低功耗的 10/100M 以太网 PHY 层芯片, 单片机通过简化媒体独立接口(Reduced Media Independent Interface, RMII)接口与以太网媒体接入控制器进行通信, 内置全双工传输模块, 支持全双工和半双工工作模式^[14]。RMII 的参考时钟通过外部引脚 XTAL1、XTAL2 连接至 25 MHz 无源晶振, 通过内

图 3 射频天线电路^[13]图 4 蓝牙天线阵列切换电路^[13]

置 PLL 时钟将频率倍频至 50 MHz。软件上可以通过不断轮询芯片基本状态寄存器(Basic Status Register,BSR)的连接状态实现网线热拔插。

3.4 电源管理电路

电源管理电路设计如图 6 所示。因为系统所用的芯片及其他功率元件的电源电压范围为 $1.8 \sim 3.6 \text{ V}$, 因此采用输出电压为 3.3 V 的 LM1117 线性稳压芯片。该芯片内部集成过热保护和限流电路, 相较于 DC-DC 芯片虽然效率较低、输出电流较小, 但具有体积小、外围器件少、成本低的优点, 只需在输出/输入端口分别放置两个 100 nF 和 $10 \text{ }\mu\text{F}$ 的陶瓷电容。蓝牙定位系统的工作电流较小, 最高不会超过 500 mA , LM1117 芯片满足设计需求。

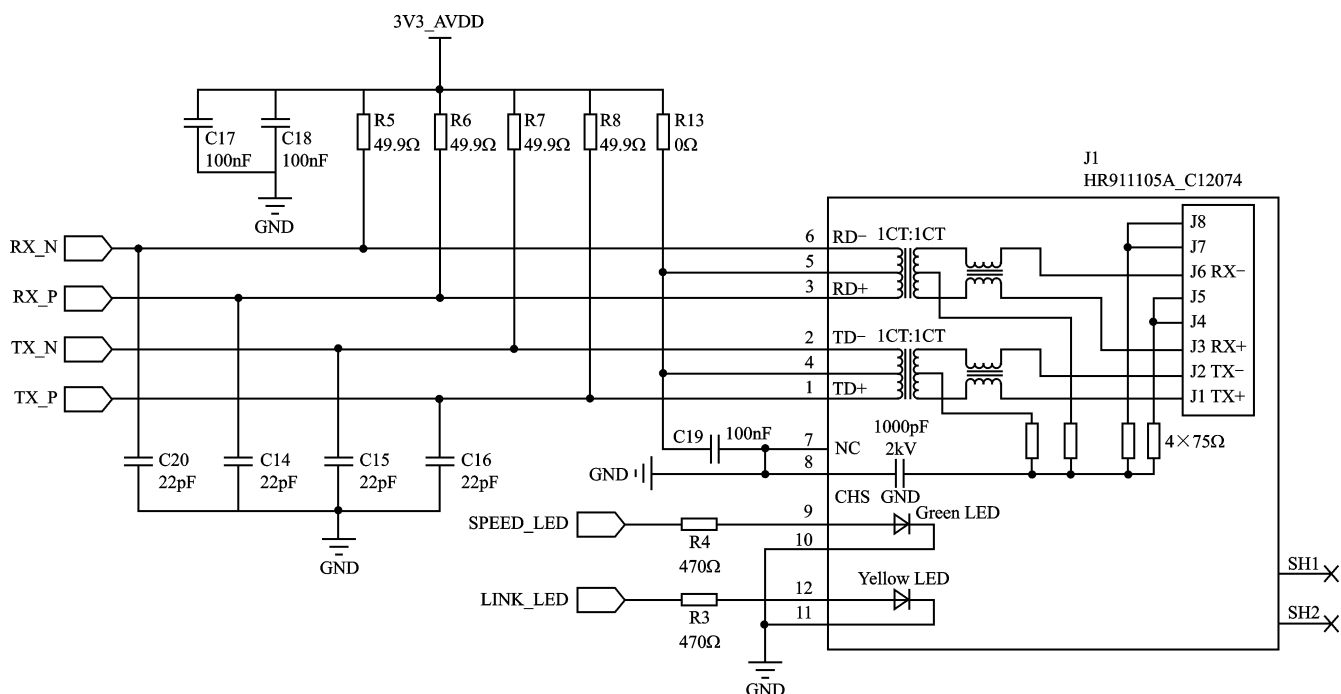


图 5 以太网通信电路

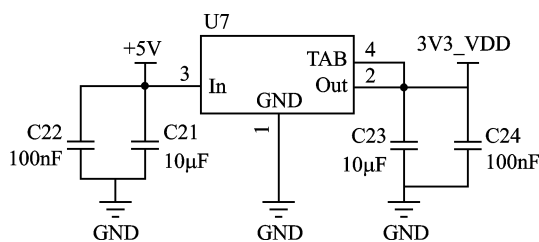


图6 电源管理电路

4 系统测试

4.1 系统测试平台

系统测试平台主要包括用于定位的蓝牙标签、STM32 单片机、蓝牙基站、笔记本电脑。STM32 与蓝牙基站组成的下位机通过有源以太网（Power Over Ethernet, POE）进行供电、连接至交换机，交换机与笔记本电脑通过网线连接，蓝牙标签则通过移动电源进行供电，本次实验使用 3 组蓝牙基站对一个蓝牙标签进行定位，在 Matlab 仿真平台下进行。

4.2 蓝牙定位功能测试

测试环境为 5 m×7 m 的矩形房间，房间内有多种家具和物品以模拟室内复杂环境。3 个蓝牙基站以三角形位置进行固定，距离地面高度为 90 cm，系统测试环境如图 7 所示。图中，圆圈标识了蓝牙基站的实际部署位置，方框标识了蓝牙标签的位置。



图7 系统测试环境

在实验时将蓝牙标签与基站放在不同位置进行测试，对蓝牙标签信号进行 50 次数据采样，计算后得出蓝牙定位的坐标。实验结果如图 8 所示，其中黑点表示蓝牙标签实际位置，灰色圆圈表示测试结果。可以看出，在所有测试位置下，系统能够准确定位蓝牙标签的位置，蓝牙标签实际位置与定位坐标位置基本吻合，定位精度可达亚米级。具体定位位置和实际位置误差如表 1 所列，最小误差为 20 cm，平均误差为 40 cm。本文设计的蓝牙定位系统能够在复杂室内环境下得到高精度定位信息。

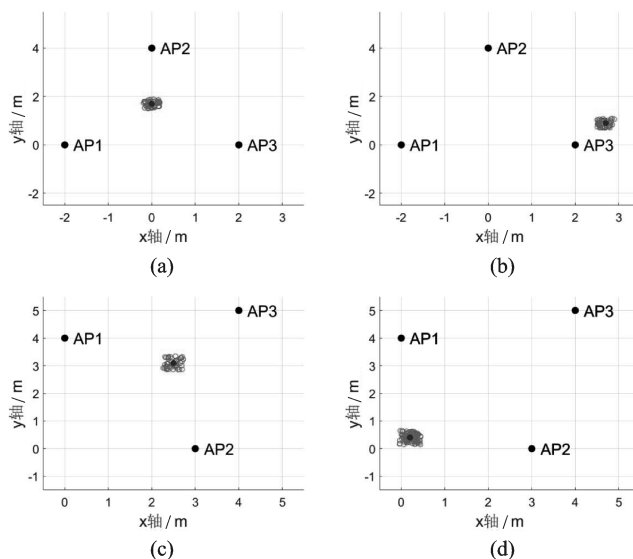


图8 不同位置下的定位结果

表1 系统定位和实际位置对比

序号	实际位置坐标	平均误差/m	最小误差/m
1	(0, 1.70)	0.401	0.381
2	(2.70, 0.90)	0.438	0.408
3	(2.50, 3.10)	0.388	0.204
4	(0.20, 0.40)	0.393	0.307

5 结语

本文设计并搭建了由 STM32 单片机和 CC2652R1 蓝牙开发板构成的蓝牙定位系统，能够准确定位蓝牙标签的具体位置，最小误差为 20 cm，平均误差为 40 cm。未来可将 AOA 算法与 RSSI 定位等测量方法融合，进一步提高系统的定位精度和鲁棒性，同时将定位算法移植到树莓派等嵌入式系统中，以进一步减小系统体积和降低安装难度。

参考文献

- [1] 张春艳, 邵建华, 聂帅, 等. 多址干扰对可见光室内定位精度的影响分析[J]. 激光杂志, 2018, 39(8): 50-54.
- [2] 郭磊, 甄杰, 杨东辉. 基站布设方案对蓝牙指纹定位精度的影响[J]. 导航定位学报, 2018, 6(2): 93-96, 110.
- [3] 肖峰, 宋喆女, 姜闻. 基于 5G 基站定位服务的应用探讨[J]. 电子测试, 2021(12): 59-60, 81.
- [4] 曹庆. 一种基于 UWB 定位的自动跟随机器人, CN207881714U [P]. 2018.
- [5] 陈国平, 马耀辉, 张百珂. 基于指纹技术的蓝牙室内定位系统[J]. 电子技术应用, 2013, 39(3): 104-107.
- [6] 李芳, 徐光明, 刘成, 等. 蓝牙连接模式对室内定位性能的影响[J]. 电子技术应用, 2021, 47(7): 125-129.
- [7] 张齐林, 李方伟, 王明月. 时间反演联合 TOA 测距的

从图 11 中可以看出,运动过程中无丢步现象,加减速速度越大,其起始频率误差与结束频率误差越小,最大速度越大,最高频率误差越小,整体误差在 2% 以内。

表 1 波形输出频率及数量统计

测试量	实测值	理论值	误差/%
起始频率/Hz	78	78.5	-0.63
最高频率/Hz	1970	1973.5	-0.17
结束频率/Hz	78	78.5	-0.63
波形输出数量/个	400	400	0

表 2 加减速参数表

参数组	1	2	3	4	5	6	7	8	9
加速度/ $r \cdot s^{-2}$	10	20	30	50	60	55	35	25	15
减速度/ $r \cdot s^{-2}$	-15	-25	-35	-55	-60	-50	-30	-20	-10
最大速度/ $r \cdot s^{-1}$	20	30	35	50	62	50	35	30	20

5 结 语

本文针对多通道、响应快、精度高的步进电机控制要求,设计了一套集通信控制为一体并可以实现梯形加减速曲线规划的控制系統。该设计优化梯形加减速算法,使用 FPGA 进行硬件实现。实验结果表明,该控制系统可以实现步进电机的平稳启停,各阶段频率误差在 2% 以内,且无丢步现象,具有一定的应用价值。ME

参考文献

- [1] 蔡娜,秦刚,张和铭,等. 步进电机速度控制技术研究[J]. 电子测量技术,2021,44(15):84-88.
- [2] 冯涛,李擎,潘月斗,等. 步进电机梯形加减速曲线规划控制实验系统设计[J]. 煤矿机械,2020,41(7):23-25.
- [3] 赵立辉,霍春宝. 基于 FPGA 的步进电机多轴联动控制系统[J]. 电机与控制应用,2013,40(11):42-45.
- [4] 齐诗萌,闵华松,黄文晖. 基于步进电机的机器人夹持器控制系统设计[J]. 仪表技术与传感器,2018(9):61-65.
- [5] 万绪伟. 基于 FPGA 的步进电机加减速控制系统设计[J]. 河南科技,2021,40(31):28-30.
- [6] 方旭,吴学杰,黄鸿国. 多通道步进电机控制系统的设计[J]. 仪器仪表与分析监测,2014(3):1-4.
- [7] 金元郁,李勇,李园园. 基于 FPGA 的步进电机控制器设计[J]. 单片机与嵌入式系统应用,2007,7(3):70-71.
- [8] 新时达选择莱迪思. FPGA 实现其最新的伺服电机产品系列[J]. 单片机与嵌入式系统应用,2021,21(12):94.
- [9] 刘雪梅,王卫军. 基于嵌入式的步进电机远程控制技术[J]. 自动化与仪器仪表,2021(7):76-79.
- [10] 段长超,刘青正,韩震宇,等. 双通道闭环步进电机控制器设计[J]. 机电工程,2020,37(8):977-982.
- [11] 刘鹏,罗衍涛,陈成军,等. 基于 FPGA 的运动控制系统加减速算法设计[J]. 仪表技术与传感器,2017(6):145-149.
- [12] 邱靖超,刘新妹,殷俊龄,等. 一种基于 FPGA 的多通道步进电机控制系统的设计[J]. 国外电子测量技术,2021,40(4):72-77.
- [13] 蔡娜,秦刚,张和铭,等. 步进电机速度控制技术研究[J]. 电子测量技术,2021,44(15):84-88.
- [14] 冯涛,李擎,潘月斗,等. 步进电机梯形加减速曲线规划控制实验系统设计[J]. 煤矿机械,2020,41(7):23-25.
- [15] 赵立辉,霍春宝. 基于 FPGA 的步进电机多轴联动控制系统[J]. 电机与控制应用,2013,40(11):42-45.
- [16] 齐诗萌,闵华松,黄文晖. 基于步进电机的机器人夹持器控制系统设计[J]. 仪表技术与传感器,2018(9):61-65.
- [17] 万绪伟. 基于 FPGA 的步进电机加减速控制系统设计[J]. 河南科技,2021,40(31):28-30.
- [18] 方旭,吴学杰,黄鸿国. 多通道步进电机控制系统的设计[J]. 仪器仪表与分析监测,2014(3):1-4.
- [19] 金元郁,李勇,李园园. 基于 FPGA 的步进电机控制器设计[J]. 单片机与嵌入式系统应用,2007,7(3):70-71.
- [20] 新时达选择莱迪思. FPGA 实现其最新的伺服电机产品系列[J]. 单片机与嵌入式系统应用,2021,21(12):94.
- [21] 刘雪梅,王卫军. 基于嵌入式的步进电机远程控制技术[J]. 自动化与仪器仪表,2021(7):76-79.
- [22] 段长超,刘青正,韩震宇,等. 双通道闭环步进电机控制器设计[J]. 机电工程,2020,37(8):977-982.
- [23] 刘鹏,罗衍涛,陈成军,等. 基于 FPGA 的运动控制系统加减速算法设计[J]. 仪表技术与传感器,2017(6):145-149.
- [24] 邱靖超,刘新妹,殷俊龄,等. 一种基于 FPGA 的多通道步进电机控制系统的设计[J]. 国外电子测量技术,2021,40(4):72-77.

- [25] 张华西(硕士研究生),主要研究方向为 FPGA 图像处理、电机控制;严飞(副教授),主要研究方向为嵌入式系统应用、三维测量与成像。通信作者:严飞,fyan@nuist.edu.cn。
- (责任编辑:薛士然 收稿日期:2022-10-25)

45 室内指纹定位技术[J]. 信号处理,2021,37(5):862-869.

- [8] Bluetooth SIG. Core Specification 5.1[EB/OL]. [2022-11]. <https://www.bluetooth.com>.
- [9] 贾灵,王薪宇,胡海,等. 一种融合 RSSI 和 AOA 定位算法的智能蓝牙防丢器[J]. 单片机与嵌入式系统应用,2021,21(7):63-66.
- [10] 石良,郭杭,陈鑫,等. 蓝牙 AOA 定位与实验分析[C]//卫星导航定位技术文集,2021:38-41.
- [11] 许鑫颖. 基于蓝牙技术的室内定位系统研究与设计[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2019.
- [12] 李宪. CC2640R2F 低功耗无线 MCU 特性介绍[EB/OL]. [2022-11]. https://bbs.elecfans.com/jishu_1110586_1_1.html.
- [13] TEXAS INSTRUMENTS. BOOSTXL - AOA[EB/OL].

[2022-11]. https://dev.ti.com/tirex/explore/node?node=AANEtvJ3vSoqWPi3wqEA__FUz_xrs__LATEST&search=BOOSTXL-AOA.

- [14] 王亚丁,徐俊臣,李冠宇,等. 基于 FreeRTOS 系统和 LwIP 协议栈的网络通讯[J]. 电子技术与软件工程,2016(20):14-15.

沈天盛(工程师)、周勇良(硕士研究生),主要研究方向为计量采集运维自动化;陈文莹(副高级工程师)、王燕(工程师),主要研究方向为智能电网及用电信息采集;朱彬斌(助理工程师),主要研究方向为无线传感器网络能量管理及用电信息采集;梁奕(硕士研究生),主要研究方向为机器视觉。通信作者:朱彬斌,18912524060@163.com。

(责任编辑:薛士然 收修改稿日期:2022-11-10)