

基于 STM32 和 FMCW 雷达的非接触式心率监测系统

张志钊¹

(1. 中南林业科技大学涉外学院, 湖南 长沙 410000)

摘要: 针对传统接触式心率监测设备佩戴繁琐、舒适性差, 不适用于长时间无感监测的问题, 设计一套基于 STM32 单片机与 FMCW 雷达的非接触式心率监测系统。系统以 STM32F103C8T6 作为主控单元, 利用 R60ABD1 毫米波雷达采集人体胸腔微动回波信号, 经过信号解析处理后得到心率数据, 通过 OLED 屏幕完成本地数据显示; 同时借助 ESP8266-Wi-Fi 模块实现数据无线传输, 当心率超出正常阈值时触发报警模块提示异常。测试结果表明, 该系统可以实现非接触条件下的心率采集、本地显示、无线上传与超限报警, 结构简单、成本低, 在静坐状态下心率测量平均误差小于 5 次/min, 适用于居家日常简易生命体征监测场景。

关键词: STM32 单片机; FMCW 雷达; 心率监测; 居家监护

基金项目: 中南林业科技大学涉外学院 2025 年校级科研项目 (SWXY202501)

DOI: 10.70693/202608276911

Non-contact Heart Rate Monitoring System Based on STM32 and FMCW Radar

Zhang Zhizhao¹

¹South University of Forestry and Technology, Hunan Changsha 410000, China

Abstract: Aiming at the problems of traditional contact-type heart-rate monitoring devices, such as cumbersome wearing procedures, poor comfort and inapplicability to long-term non-perceptual monitoring, a non-contact heart-rate monitoring system based on STM32 microcontroller and FMCW radar is designed. The system adopts STM32F103C8T6 as the main-control unit, uses the R60ABD1 millimeter-wave radar to collect echo signals of tiny human chest-wall vibrations, obtains heart-rate data after signal analysis and processing, and realizes local data display via an OLED screen. Meanwhile, wireless data transmission is achieved with the ESP8266-Wi-Fi module, and the alarm module is triggered to warn of abnormalities when the heart rate exceeds the normal threshold. Test results show that the system can complete non-contact heart-rate acquisition, local display, wireless upload and over-limit alarm. Featuring simple structure and low cost, it achieves an average heart-rate measurement error of less than 5 beats/min in the sitting-still state, and is suitable for simple daily vital-sign monitoring at home.

Keywords: STM32 microcontroller; FMCW radar; heart rate monitoring; home-based monitoring

1 引言

心率是反映人体心血管健康状态的重要生理参数, 静息心率的变化能够直观体现人体身体状况, 对于居家老人监护、睡眠健康监测具有重要参考价值^[1]。目前市场主流心率检测方案大多接触式检测, 包括心电采集设备、光电手环、胸带式心率传感器等。这类设备需要与人体皮肤紧密接触, 长时间佩戴会产生压迫感, 睡眠过程中佩戴容易脱落; 对于烧伤患者、皮肤过敏人群, 接触式传感器还会带来皮肤刺激, 难以实现长期连续无感监测^[2]。

毫米波 FMCW 雷达通过发射高频电磁波, 接收人体胸腔振动带来的回波信号, 依靠相位变化提取胸腔微动信息, 不需要和人体发生物理接触, 具备不受光照、不侵犯人脸隐私、可穿透薄衣物等优势, 成为生命体征非接触感知领域的热门技术^[3]。国外多家企业已经推出基于毫米波雷达的生命体征感知模块, 模块集成度高, 但是成品设备价格昂贵, 多数面向工业场景, 普通家庭难以普及。国内相关研究大多集中于 PC 端算法仿真, 重点围绕信号降噪、伪影抑制算法开展研究^[4-6], 完整嵌入式硬件系统的落地产品相对较少, 很多方案算法复杂, 对主控算力要求高, 难以在低成本单片机平台实现^[7]。

针对以上现状, 本文设计一套低成本嵌入式非接触心率监测系统。系统选用 STM32F103C8T6 作为主控芯片, 采用 R60ABD1 一体化 60GHz FMCW 雷达模块完成胸腔微动信号采集, 雷达模块内部完成基础信号处理, 降低单片机运算压力。系统实现心率本地 OLED 显示、ESP8266 无线网络数据上传、心率异常声光报警完整功能。整套系统硬件成本低廉, 搭建难度低, 不需要上位机配合即可独立运行, 能够满足普通家庭环境下简易心率监测需求, 对于推广非接触生命体征监测技术具有一定实践意义。

2 系统设计

2.1 系统总体设计

本系统整体由主控模块、FMCW 雷达采集模块、OLED 显示模块、ESP8266 无线通信模块、报警模块五部分构成, 总体设计框图如图 1 所示。系统供电统一采用 5V 直流电源, 各个外设模块通过串口、I2C、GPIO 接口与主控芯片相连, 参考现有嵌入式雷达监测系统架构思路, 系统完整信号链路分为信号采集层、主控处理层、输出执

行层。信号采集层由 R60ABD1 雷达完成人体胸腔微动回波采集与初步运算; 主控处理层由 STM32 负责接收雷达输出数据包, 完成帧校验、数据解析、阈值逻辑判断; 输出执行层包含 OLED 显示、Wi-Fi 数据上传、声光报警, 完成人机交互、数据远程传输和异常告警。

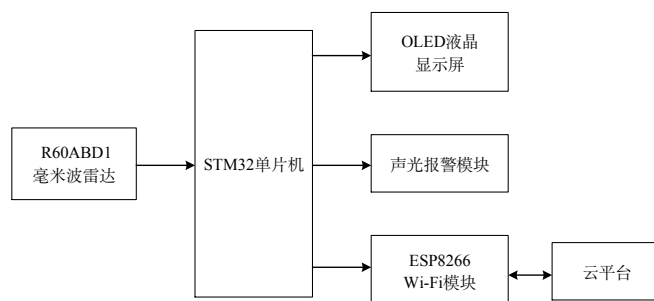


图 1 总体设计框图

系统工作流程如下: R60ABD1 雷达感知人体胸腔微动, 将初步解析后的心率原始数据通过 TTL 串口发送至 STM32 主控; STM32 接收雷达数据包完成校验、解析, 得到实时心率数值; 一方面将心率信息输出至 OLED 屏幕进行本地可视化显示; 另一方面调用 ESP8266 模块把心率数据通过 Wi-Fi 上传至云平台; 同时单片机将实测心率与预设正常心率阈值对比, 若检测到心率超出安全区间, 驱动报警模块输出声光告警。

2.2 系统的硬件设计

(1) STM32F103C8T6 单片机

STM32F103C8T6 是整个系统的主控核心, 采用 ARM-Cortex-M3 内核, 最高工作频率 72 MHz, 片上集成 64KB Flash、20KB SRAM, 外设资源包含 3 路 USART 串口、2 路 I2C 接口、多个通用 GPIO 口。模块工作电压 3.3V, 外部 5V 电源经过降压芯片 AMS1117 转至 3.3V 为主控芯片供电。STM32F103C8T6 单片机原理图如图 2 所示, 其主要功能包括: ①通过 USART3 串口接收 R60ABD1 雷达输出的体征数据包, 完成数据帧校验、解析; ②通过 I2C 接口控制 OLED 屏幕驱动, 输出心率监测结果; ③通过 PA2 和 PA3 引脚与 ESP8266 模块通信, 完成心率数据封装与 Wi-Fi 发送; ④读取心率数值与阈值做逻辑判断, 输出高低电平控制报警模块; ⑤统筹各外设模块工作时序, 协调硬件之间的数据交互。

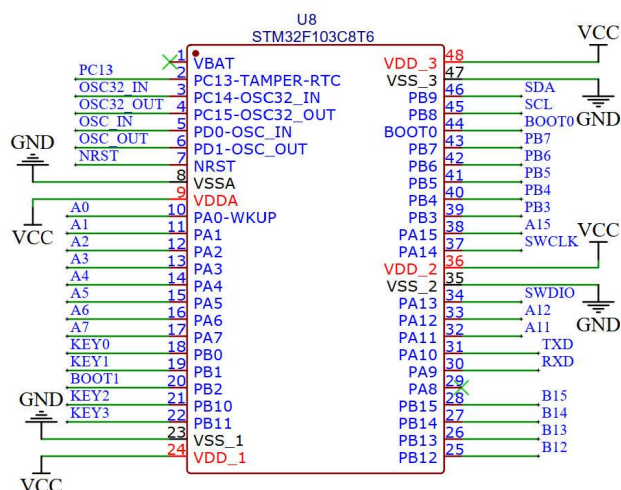


图 2 STM32F103C8T6 单片机原理图

(2) R60ABD1 毫米波雷达

R60ABD1 属于 60 GHz FMCW 毫米波雷达模块，专门针对人体呼吸、心率等微动探测开发，有效探测距离为 0.2~2 m，适合室内近距离人体监测，当人体距离超出探测范围，模块会输出无效标志位。模块供电电压 5V，硬件接口为 TTL 串口，波特率默认 115200，其内部集成射频天线、射频前端与预处理 MCU，不需要外部复杂射频电路。R60ABD1 毫米波雷达原理图如图 3 所示，其主要功能包括：①发射调频连续波信号，接收人体胸腔振动产生的反射回波；②模块内部完成信号滤波、快速傅里叶变换等基础运算，输出解析后的心率原始数据，通过 TTL 串口直接向主控 STM32 传输数据。

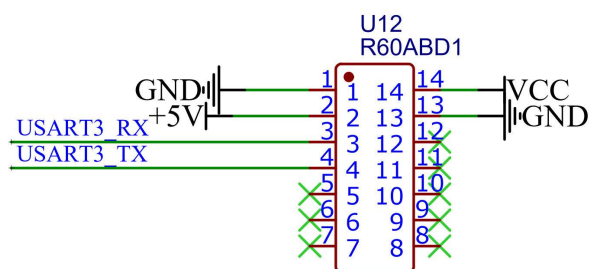


图 3 R60ABD1 毫米波雷达原理图

(3) OLED 液晶显示屏

选用 0.96 英寸 I2C 接口 OLED 显示屏，供电 3.3-5V，分辨率 128×64，作为系统本地人机交互输出部件。硬件采用 I2C 通信，仅占用主控两个 IO 引脚，节省单片机串口资源。OLED 液晶显示屏如图 4 所示，其主要功能为：①接收 STM32 发送的显示指令与数据，实时刷新显示当前检测得到的心率数值；②可辅助显示系统工作状态，例

如“监测中”“Wi-Fi 已连接”“无目标”等提示。OLED 功耗低、对比度高，不需要背光，在弱光环境下依然清晰可读，适合嵌入式小型监测设备的本地信息输出。

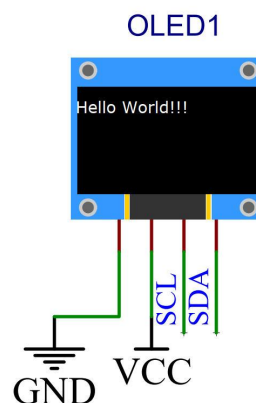


图 4 OLED 液晶显示屏原理图

(4) ESP8266Wi-Fi 模块

ESP8266-01S 是一款低成本串口转 Wi-Fi 模块，模块供电 3.3V，使用 AT 指令进行配置，支持 STA 模式连接家庭路由器。模块通过 PA2 和 PA3 引脚与 STM32 进行数据交互，在嵌入式生命体征监测系统中常用来完成数据远程上报。其主要功能包括：①接收主控发送的心率监测数据，完成 TCP/UDP 数据包封装；②将本地心率数据通过无线网络上传至云平台，实现监测数据远程查看，拓展系统远程监护能力。本系统采用 TCP 客户端模式，连接本地调试服务器，实现心率数据持续上报。

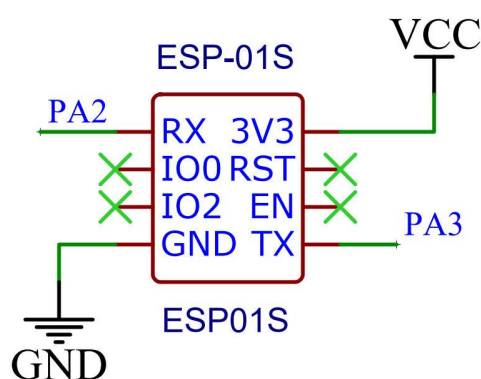


图 5 ESP8266-01S 原理图

(5) 声光报警模块

声光报警模块由有源蜂鸣器与红色 LED 指示灯组成，IO 口由 STM32 单片机 PC4 引脚直接驱动，采用三极管放大驱动，避免单片机 IO 口驱动能力不足。其主要功能为：STM32 将实测心率

和预设阈值(成年人正常静息心率 60-100 次/min)对比,当检测心率低于下限或者高于上限时,主控 PC4 引脚输出高电平,触发蜂鸣器鸣叫、LED 点亮,实现声光报警,提示心率出现异常。正常监测状态下报警模块处于关闭状态。声光报警电路原理图如图 6 所示。

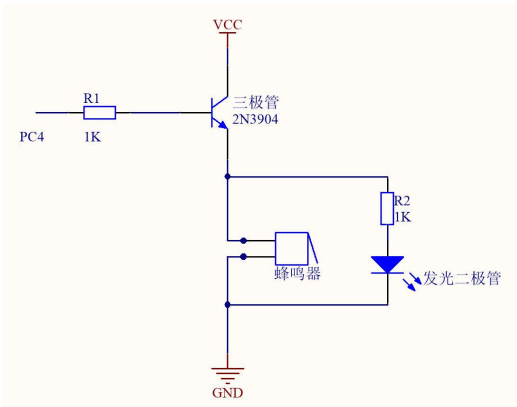


图 6 声光报警电路原理图

2.3 系统的软件设计

软件基于 STM32 标准外设库开发,采用模块化裸机编程,各个外设驱动独立封装,程序不使用操作系统,依靠主循环轮询处理各个外设事件,降低对硬件资源的消耗。软件整体可以划分为底层驱动层、数据解析层、业务逻辑层。底层驱动层包含串口驱动、I2C 驱动、GPIO 驱动;数据解析层负责雷达数据包解析、AT 指令交互处理;业务逻辑层实现显示、数据上传、阈值报警逻辑,系统主程序执行流程如图 7 所示。

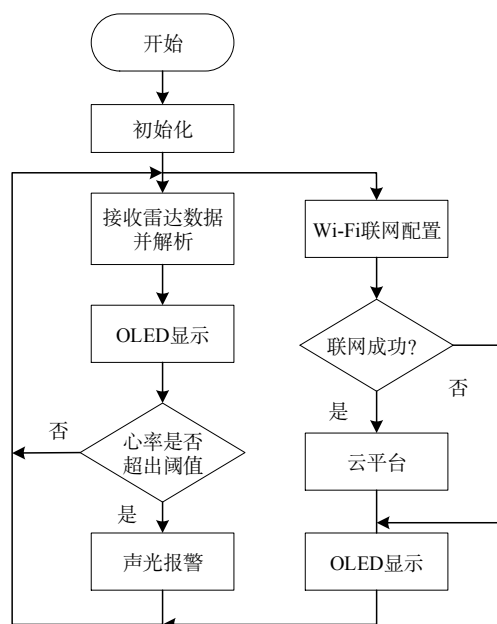


图 7 系统主程序执行流程图

1) 系统上电初始化:单片机上电之后依次完成系统时钟初始化、GPIO 端口初始化、两路串口初始化 (USART3 对接 R60ABD1 雷达, USART2 对接 ESP8266)、I2C 外设初始化 (OLED);初始化完成后 OLED 屏幕显示开机欢迎界面,提示系统正在启动。

2) Wi-Fi 联网配置:STM32 向 ESP8266 模块发送 AT 指令,配置模块工作模式为 STA 模式,写入路由器 Wi-Fi 名称与密码,建立 TCP 客户端连接,等待模块完成无线网络连接;联网成功后 OLED 更新提示“Wi-Fi 已连接”。如果联网失败,重复发送联网指令,3 次连接失败则屏幕提示联网异常,系统继续执行本地监测功能,保证断网状态下设备依然可以本地工作。

3) 雷达数据接收循环:系统进入主循环,STM32 持续监听串口中断,接收来自 R60ABD1 雷达输出的串口数据包。雷达输出数据具备固定帧头、帧尾,程序对接收的数据帧做帧头、帧尾校验,校验失败直接丢弃该组数据,过滤乱码与无效干扰数据;校验通过后解析出实时心率数值与目标有效标志位,如果标志位判定无人目标,则屏幕显示“无检测目标”。

4) 本地显示处理:解析得到有效心率数据后,STM32 调用 OLED 驱动函数,刷新屏幕显示当前心率数值与系统运行状态。

5) 数据无线上传:将心率数据组装成简单字符串数据包,通过串口发送给 ESP8266 模块,由模块完成网络数据包封装,执行数据上传操作;Wi-Fi 未连接状态下跳过上传步骤。

6) 心率阈值判断与报警控制:把解析出的心率值和预设阈值做比较。软件增加防抖计数逻辑,单次异常不触发报警,连续采集 3 组数据均判定心率超出 60-100 次/min 正常区间,才会触发报警;若心率处于正常区间,报警模块保持关闭;若超出阈值范围,单片机置位对应 IO 口,驱动蜂鸣器和 LED 执行声光报警;连续多帧数据恢复正常区间之后自动关闭报警输出,避免瞬时噪声带来的误报警。

7) 循环回到雷达数据接收步骤,持续重复采集-解析-显示-判断整套流程,实现连续心率监测。

3 系统的测试与分析

硬件实物搭建完成后,供电使用 5V 2A 直流电源, R60ABD1 雷达模块朝向测试人员胸腔,雷达与人体距离设置为 0.5~1.5m。选取 5 名健康志愿者参与测试,年龄 21-27 岁,测试状态为静坐,

身体尽量保持静止。以医用光电手环作为心率真值参考,手环佩戴于受试者手腕,同一时刻读取手环真值与本系统输出心率,每名受试者采集20组样本并记录相应的数据。选取部分测试样本结果如表1所示。

表1 心率测试对比数据 (单位: 次/min)

样本序号	手环参考真值	本系统测量值	绝对误差
1	72	74	2
2	75	73	2
3	68	71	3
4	80	77	3
5	84	87	3
6	66	69	3
7	78	76	2
8	90	86	4

由表1可知,静坐状态下多组样本统计的系统测量平均绝对误差为2.75次/min,整体测量误差控制在5次/min以内。系统OLED屏幕可以实时刷新心率,Wi-Fi网络正常时数据能够稳定上传至云端,人为设置心率超限条件,声光报警模块可以正常触发。为了验证该系统的鲁棒性,开展干扰场景测试,测试人员身体出现小幅晃动时,雷达回波引入运动伪影,测量误差明显增大,部分样本误差超过10次/min;当人体距离雷达超过2m,设备识别不到人体目标,屏幕显示无目标。

结合测试现象,分析系统测量误差主要来源于以下三个方面:第一,人体微动伪影,人体肢体轻微晃动、躯干抖动会改变胸腔回波相位,对雷达测量结果带来干扰;第二,雷达模块本身测量固有误差,R60ABD1模块内部算法对于心跳这类微弱信号的提取存在一定误差;第三,衣物厚度的影响,较厚衣物会衰减毫米波回波信号,降低回波信噪比。

4 总结

本文设计了一套基于STM32与60GHz FMCW毫米波雷达的非接触式心率监测系统。以

STM32F103C8T6为主控,搭配R60ABD1雷达完成非接触心率信号采集,实现心率本地OLED显示、ESP8266无线数据上传、心率异常声光报警功能。硬件部分详细阐述了主控、雷达、显示、无线、报警各个模块电气特性与功能;软件部分介绍了上电初始化、串口数据解析、阈值防抖报警完整执行流程。经过实物测试,在人体静坐条件下系统能够稳定完成心率监测,平均测量误差小于5次/min,硬件成本可控,无需接触人体,适合居家简易心率监测场景。

本系统依然存在不足,人体运动条件下测量误差较大。后续优化可以在STM32主控端增加滑动平均滤波算法,对雷达输出的心率序列做平滑处理,抑制跳变异常值;同时可以拓展增加呼吸信号解析,实现呼吸与心率双参数同时监测,进一步提升系统的实用价值。

参考文献:

- [1]邹永洋.基于毫米波雷达的非接触式心率检测方法研究[D].浙江理工大学,2022.
- [2]陶启明.基于超宽带雷达的生命特征信息提取技术研究[D].西安:西安电子科技大学,2022.
- [3]胡雨璇,夏朝阳,徐丰.一种鲁棒的毫米波雷达人体呼吸心跳测量方法[J].上海航天(中英文),2022,39(3):130-137.
- [4]屈乐乐,刘淑杰,杨天虹,等.基于VMD的调频连续波雷达生命信号提取[J].电讯技术,2022,62(5):612-618.
- [5]弭晴,马永涛,黄祉同.基于多序列WOA-VMD算法的超宽带雷达心率检测[J].传感技术学报,2024,37(7):1144-1153.
- [6]潘志刚,费叶奇,郭书雅,等.基于EWT-VMD的毫米波雷达生命体征检测[J].仪器仪表学报,2025,46(12):300-310.
- [7]阎世梁,王银玲,王敏,等.基于毫米波雷达的生命体征信号检测实验教学设计[J].实验室研究与探索,2024,43(5):122-128+174.