

基于时差法的物联网超声波测风系统

李峤和 唐亮 卞晓晓 李俊熙

南京航空航天大学金城学院信息工程学院, 江苏 南京 211156

摘要: 本研究设计并实现了一种高精度、无机械磨损的超声波风速风向测量系统, 针对传统机械式风速风向仪存在的启动风速高、易受恶劣天气影响及存在机械磨损等问题, 提出了基于时差法 (ToF) 的固态测量解决方案。在硬件设计方面, 系统采用主从双机协同架构, 主控芯片选用具备强大浮点运算与高速 ADC 采集能力的 STM32L476RGT6, 负责超声波信号的收发与数字信号处理 (DSP); 通信网关搭载 ESP32-C3 SuperMini 芯片, 专门负责物联网数据传输。在核心算法上, 系统创新性地结合了自适应波形匹配 (MSE 算法) 与线性插值过零检测技术, 突破了传统阈值法的精度瓶颈, 实现了微秒级的飞行时间测量精度 [5]。此外, 系统基于 MQTT 协议并引入双向 SSL/TLS (mTLS) 证书加密机制, 实现了将包含风速、风向、声速等特征的 JSON 格式数据安全、低延迟地上云至 EMQX 企业级物联网平台。实验结果表明, 该系统实现了对风速风向的非接触式、高频实时测量, 有效提升了复杂环境下的气象监测精度, 并显著增强了数据的云端互联与安全交互能力。

关键词: 超声波风速仪; 时差法; STM32 主控; MQTT 协议; 物联网技术

0 引言

随着智慧气象、现代农业、风力发电以及高层建筑监测等领域的快速发展, 对微气象环境数据的实时性、准确性和可靠性提出了更高的要求。传统机械式风速计 (如风杯式、风向标) 虽然应用广泛, 但其固有结构决定了其存在启动风速阈值、机械摩擦损耗大、易产生转动惯量误差等缺陷。特别是在严寒结冰或风沙环境中, 机械部件极易卡死失效, 导致维护成本居高不下。

超声波风速风向仪利用超声波在空气中传播速度受风速向量叠加影响的物理特性, 通过测量超声波脉冲在不同方向上的飞行时间差 (ToF) 来计算风速与风向。这种全固态、无活动部件的测量方式, 彻底解决了机械式风速仪的易损问题^[1]。然而, 超声波测风系统对时间测量的精度要求极高 (通常需要纳秒级分辨率), 且空气中的超声波信号易受噪声衰减与多径效应干扰。同时, 现代物联网 (IoT) 对气象站的数据上云及安全性提出了新的挑战。

针对上述问题, 本研究设计并实现了一种基于 STM32

底层高速信号处理与 ESP32-C3 安全物联网通信相结合的智能超声波风速风向测量系统。该系统不仅具备极高的测量精度与动态响应能力, 还能通过安全的 MQTT 通信链路与各类微信小程序及 Web 监控终端进行无缝对接, 具有一定的工程应用价值与市场前景。

1 系统架构与硬件设计

1.1 整体架构

系统整体分为四个层级:

感知层: 由正交分布的四个超声波换能器 (North, South, East, West) 组成收发阵列, 工

作频率为 80kHz, 配合环境温度传感器用于声速补偿校准。

控制层: 核心处理器选用 STM32L476RGT6 微控制器。其内置的高速 1Msps ADC 负责对超声波回波信号进行高速采样, 并利用硬件浮点单元 (FPU) 执行数字带通滤波、寻峰匹配及过零检测算法。

通信层: 采用 ESP32-C3 SuperMini 作为透传网关。STM32 与 ESP32 通过 UART2 进行串口数据交互, ESP32 负责建立 Wi-Fi 连接与云端 MQTT 服务器的安全握手。

应用层: 基于 EMQX Cloud 搭建的物联网服务端, 支持通过微信小程序等终端实时订阅并解析设备发送的 JSON 数据报文 (包含 val 风速, dir 风向, c 声速等分量)。

系统整体设计路线如图 1 所示。

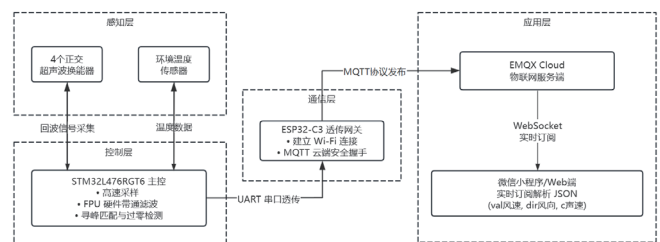


图 1 系统整体设计示意图

1.2 硬件选型与集成

信号调理与采集: 系统预设了 270us 的采样盲区, 以屏蔽发射瞬间的机械震动串扰。回波信号经过运放放大后, 直接送入 STM32 的 ADC 进行 1ms 窗口的高速采样。

双机协同供电设计: 由于 ESP32-C3 在 Wi-Fi 射频发射时存在较大的瞬态电流, 系统在供电设计上将核心测量电路与通信模块进行电源隔离, 以防止射频脉冲干扰高精度 ADC 采样的参考电压。

2 核心测量原理与算法

2.1 超声波时差法 (ToF) 测风模型

系统采用二维平面上两对正交放置的超声波探头进行交叉测量。假设探头间距为 L ，超声波在静止空气中的声速为 c ，环境风速为 v ，风向与超声波传播路径的夹角为 α 。顺风与逆风方向的传播时间 t_1 、 t_2 满足：

$$t_1 = \frac{L}{c + v \cos \alpha} \quad t_2 = \frac{L}{c - v \cos \alpha}$$

经过数学推导，该方向上的风速分量即可通过时差求出，且与声速 c 相互解耦，提升了测量稳定性^[2]。时差法测量方法如图 2 所示。

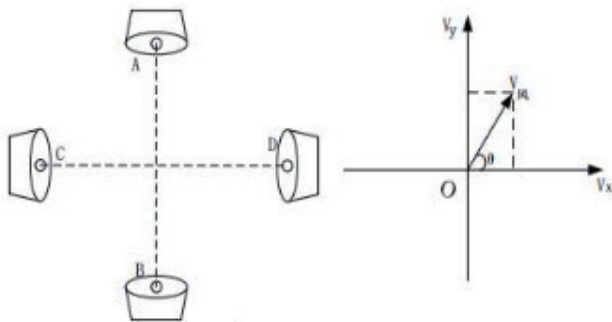


图 2 时差法测量方法示意图

2.2 信号处理与特征提取

为实现高精度的时差测量，传统阈值比较法易受信号衰减影响导致误差。本项目提出了一种组合式波形处理算法。

数字带通滤波：采用预先计算的一阶带通滤波器系数（中心频率 40kHz/80kHz），对 ADC 原始信号进行滤波，显著抑制低频机械噪声与高频电磁干扰。

包络寻峰与自适应波形匹配 (MSE)：算法在预处理后提取回波信号的波峰群，并在一定搜索范围内利用均方误差寻找与参考波形最匹配的核心峰值，解决了波形畸变引发的失锁问题^[9]。

过零检测：在锁定主峰后，算法选取特定的过零点，并利用相邻采样点进行线性插值，计算出具有小数精度的精确过零时间。该方法将时间测量分辨率由 ADC 采样率决定。

3 物联网通信与上云方案

3.1 串口数据透传架构

为保障底层超声波采样的强实时性，系统摒弃了在 STM32 端直接解析 AT 指令的传统方案^[8]。STM32 主控板仅负责生成包含风速 (val)、风向 (dir)、声速 (c) 以及南北 / 东西向风速分量 (ns, ew) 的精简 JSON 字符串，并通过 UART2 以换行符 \n 为界发送给协处理器。

ESP32-C3 运行独立的异步任务，通过硬件串口完整读取 JSON 流，并进行格式合法性校验，

避免了数据粘包与小程序端解析崩溃的问题。具体过程如图 3 所示。



图 3 数据上传及通信划分示意图

3.2 SSL/TLS 双向认证安全通信

针对气象数据的防篡改与云端接入安全，ESP32-C3 内

置了 WiFiClientSecure 加密组件。系统加载了 DigiCert 根证书以校验 EMQX 云端服务器的合法性，同时烧录了专属的设备端证书与私钥，实现了 MQTTs 的强加密链路^[8]。结合动态发送频率控制算法，系统可根据实际风速突变情况灵活调整上报周期 (1Hz~0.1Hz)，在保证数据实时性的同时优化了云端并发压力。

3.3 小程序端监控与数据可视化

小程序端实时订阅 csb/data 主题，前端业务逻辑层通过引入异常捕获机制，对 ESP32-C3 透传的 JSON 数据流进行高鲁棒性解析，有效屏蔽了网络波动可能导致的残缺报文。在 UI 展现方面，界面采用响应式数据双向绑定技术，设计了动态风速仪表盘与 360 度风向罗盘，直观映射超声波底层结算出的风矢量信息。

同时，小程序内部集成了数据平滑滤波算法，针对瞬态阵风进行滑动窗口平均处理，并动态绘制风速变化折线图。当系统声速校验超出正常阈值或底层上报硬件错误码时，小程序能够触发红色高亮预警，提升了智慧园区或野外气象监测的交互性与实用性。

4 实验验证与性能分析

4.1 静态零风速标定

系统在室内无风密闭环境下进行了多轮校准测试。通过

记录 16 至 32 个周期的超声波零风速过零点均值，计算出阵列安装的机械偏差时间常数，并在非易失性存储器中保存。校准后，系统静

态漂移误差被控制在 3m/s 以内。

4.2 动态响应与系统稳定性

动态测量范围：系统可准确捕捉 0.1 m/s 的微风至 30 m/s 的宽范围风速。在启动风速上，本系统无机械摩擦，启动风速可达 0.3 m/s，优于传统风杯式（约 0.5 m/s）。

声速一致性校验：通过测得的正交通道声速 c ，并结合环境温度推算的理论声速公式

$$c \approx 20.05\sqrt{T+273.15}$$

进行比对，当二者误差 $<2\text{m/s}$ 时才判定当次数据有效，大大降低了异常突变数据的发生率。

4.3 通信性能与系统功耗分析

在通信性能方面，为验证 SSL/TLS 加密链路及 ESP32-C3 透传网关的可靠性，系统在连续 24 小时的压力测试中，设定超声波数据采集与 MQTT 报文发布频率为 1Hz。经 EMQX 云端控制台日志统计与比对，在常规 Wi-Fi 覆盖环境下，系统端到端的平均通信延迟稳定在 150ms 左右，1Hz 高频连续发送条件下的综合丢包率低于 0.5%。这表明 STM32 发送纯净 JSON 与 ESP32 异步上云的架构，不仅消除了传统 AT

指令易引发的“粘包”与“阻塞”问题，还有效保障了高并发下的数据完整性。

5 结语与展望

在本项目的实施过程中，我们充分利用了 STM32 强大的底层信号处理能力与 ESP32 物联网互联特性，通过模块化的软硬件分离设计与精细的波形识别算法，成功实现了一款高精度、免维护的物联网超声波风速风向仪。该系统有效克服了传统风速仪在恶劣环境下的短板，并将数据安全稳定地推送至云端，为多终端实时监控提供了坚实的数据基础。

展望未来：其一，我们将激活并融合主板预留的 9 轴 IMU 传感器。利用马德威克滤波算法输出设备的俯仰角与横滚角，在算法层面上进行风速的三维空间姿态补偿计算。这将使得该超声波风速仪能够直接应用于浮标、船舶、无人车等易发生倾斜晃动的移动载体上。

其二，进一步优化系统的低功耗管理。探索在静风期进入休眠状态，通过间歇性唤醒 ESP32-C3 与传感器，使设备完全适应太阳能或锂电池独立供电的野外长期驻守需求。

参考文献：

- [1] 刘小松, 解晓冉, 单泽彪, 等. 基于二次相关的超声波风速风向测量方法 [J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(4): 322-329.
- [2] 单泽彪, 韩明轩, 谢世娟, 刘小松. 基于二次相关的双阵元接收阵列超声波风矢量测量 [J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(8): 113-119.
- [3] 任晓晔, 陈晓, 郭妍. 超声波测风换能器对风速的影响研究 [J]. 电子测量技术, 2019, 42(7): 118-124.
- [4] 张捷光, 齐文新, 齐宇. 三维超声波测风仪原理与应用 [J]. 计算机与数字工程, 2013, 41(1): 124-126.
- [5] 曹长宏, 蒋立辉. 高精度超声波测风仪的设计 [J]. 传感器与微系统, 2010, 29(2): 87-89.
- [6] 徐立强, 郑贵林. 超声波风速风向仪的研制 [J]. 微计算机信息, 2009, 25(8): 92-93.
- [7] 罗中必. 基于 DSP 的超声波风速风标测量系统研究 [D]. 内蒙古科技大学, 2009.
- [8] 周立功, 等. STM32 微控制器应用开发实战 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2018.
- [9] 卢胜林, 单泽彪, 刘小松, 等. 基于 ESB 波束形成的超声波传感器风速风向测量 [J]. 仪表技术与传感器, 2021(10): 115-119.

作者简介: 李峣和(2002—), 男, 汉族, 陕西省西安市, 本科在读, 研究方向: 嵌入式硬件开发。

唐亮(1986—), 男, 汉族, 辽宁盖州, 硕士, 副高, 研究方向: 教育教学管理。

卞晓晓(1982—), 女, 汉族, 河南沈丘, 硕士, 副教授, 研究方向: 嵌入式系统应用。

李俊熙(2004—), 男, 汉族, 安徽省宿州市, 本科, 研究方向: 嵌入式硬件开发。

项目信息: 江苏省大学生创新创业项目, 低成本超声波风速风向测量系统研发及市场化 (S202513655053X)。