

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2417343

一种多要素模块化自动气象站设计^{*}

行鸿彦^{1,2} 李浩琪²

(1. 南通理工学院电气与能源工程学院 南通 226001; 2. 南京信息工程大学电子与信息工程学院 南京 210044)

摘要: 随着气象观测向社会化和智能化发展,现有的地面自动气象站由于其分体式设计、较大体积、高功耗和成本,已不能满足新的需求。本文设计了一种多要素模块化自动气象站,通过模块化组合和数字传感器技术,灵活地观测温湿度、气压、PM2.5、风速和风向等气象要素。针对超声波测风仪受环境干扰的严重问题,本文采用了多路负反馈电路设计的带通滤波器,不仅缩小了超声波信号调理电路的规模,而且提高了超声波脉冲信号的质量。此外,引入因子,调节自适应滤波算法滑动窗口的大小,降低环境对信号的干扰。实验结果显示,在所设计自动气象站的设计中所使用的数字传感器能够满足观测要求,测风模块其测风的最大误差为14.8%,测角的最大误差为11.78%。

关键词: 自动气象站;模块化;超声波测风

中图分类号: TN710 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.4010

Design of a multi-element modular automated weather station

Xing Hongyan^{1,2} Li Haoqi²

(1. School of Electrical and Energy Engineering, Nantong Institute of Technology, Nantong 226001, China; 2. School of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: As meteorological observations evolve towards socialization and intelligence, the existing ground-based automatic weather stations can no longer meet the new demands due to their split design, large volume, high power consumption, and cost. This paper designs a multi-element modular automatic weather station. This weather station uses modular composition and digital sensor technology to flexibly observe meteorological elements such as temperature and humidity, air pressure, particulate matter 2.5, wind speed, and wind direction. This paper employs a band-pass filter designed with multi-channel negative feedback circuits to address the severe environmental interference affecting ultrasonic anemometers. This approach reduces the scale of the ultrasonic signal conditioning circuit and improves the quality of the ultrasonic pulse signals. Moreover, an adaptive filter algorithm with a sliding window size adjustment factor is introduced to reduce signal environmental interference. The experimental results show that the digital sensors used in the designed automatic weather station meet the observation requirements. Specifically, the wind measurement module has a maximum wind speed error of 14.8% and a maximum wind direction error of 11.78%. These figures indicate that the new weather station achieves high accuracy in wind measurements and demonstrates stable performance.

Keywords: automatic weather station; modularization; ultrasonic wind measurement

0 引言

地面气象观测是气象观测的重要组成部分,它对于了解和掌握天气变化情况,为人们的生产、生活和经济发展提供有力的保障具有重要意义^[1]。通过对天气、气候、大气等信息的准确观测,为天气预报、气候变化预测和气象科研提供准确的数据保障^[2]。由于我国幅员辽阔,地广人多,发生

气象灾害,经常造成重大损失,严重影响着我国农业、工业、军事、国民经济发展和人民生活水平的提高,为此加强地面观测技术进步,实现智能便携的气象观测,对于防灾减灾是非常必要的^[3]。

目前自动气象站已近发展到了较为成熟阶段,已经实现了网络化、智能化,可以监测多种气象要素,并且能够与其他系统进行数据共享和交互^[4]。从结构上来看,当前自

收稿日期:2024-11-12

*基金项目:南通理工学院科技创新与服务地方团队项目(KCTD008)资助

自动气象站有 3 种,分别为紧凑型^[5]、一体式^[6]和独立式^[7]。紧凑型和一体式主要应用于农业气象观测,这两种类型的自动气象站数据传输能力有限,且不会保存到本地或者云端。而独立式自动气象站可以通过 WiFi 将数据传输到集中处理器,这种类型的气象站可以将采集到的数据直接传送到云端进行集中的处理^[8]。与更传统的有人值守站相比,使用自动气象站(automatic weather station, AWS)有许多优势^[9],能够监测稀疏和农村地区的数据、降低成本、减少随机误差、提高可靠性、测量精度等^[10]。然而,在安装这些类型的气象站之前也面临一些困难。主要包括安装困难、与专业气象观测员的测量数据出现分歧(特别是在降水、云量和云底的情况下)、传输成本等^[11]。范鹏程等^[12]通过在气象站的基础上引入网络芯片 W5500,来实现气象数据网页端的可视化;甘志强等^[13]通过设置采集器端前置算法,对同一时刻、同一要素多个探测数据进行阈值交叉验证,得出最优的探测数据;Bernardes 等^[14]设计了一种低成本的自动气象站以及智能传感器校准方法;Kusriyanto 等^[15]使用基于 Arduino 设计了一种应用于校园的气象站。上述研究均采用 RS485 通信协议将各个传感器连接起来,再通过网关上报数据,使得自动气象站的体积和功耗增加,且对安装和调试人员有一定的技术要求,不利于大众气象观测的发展。

针对上述存在的问题,本文设计了一种多要素模块化自动气象站,其硬件分主控模块、传感器及通信模块和测风模块 3 个部分。主控模块主要负责电池的充放电管理和数据的收发,传感器及通信模块负责温湿度气压以及 PM 的数据采集和组网上报、测风模块负责风速风向的采集。基于模块化思想在 USB-C 接口中采用多种通信协议以适配不同的传感器。同时,为了实现模块化和小型化,设计了可用于手持测量的测风传感器,将陀螺仪数据与测风数据相融合得到最终的测量结果。

1 系统整体设计

系统结构如图 1 所示。主控芯片采用 STM32,通过一条 IIC 总线与 OLED 屏幕、SHT20 温湿度传感器、BMP240 气压传感器进行通信,将所得到的数据显示在 OLED 中,3 个串口分别与 E103-W07 模块、超声波传感器和定位模块通信。GP2Y10 粉尘传感器将所测量的值转换为电压输出,将输出的电压信号与 STM32 的 IO 口相连接通过 A/D 转换得到电压值,最后将电压值转换为 PM 值。陀螺仪与测风传感器通过 UART 连接,作为电子罗盘。主要考虑到在手持测风时的传感器姿态会对测风结果造成影响,因此将测风结果与传感器航向角融合得到真实测量结果,消除人为转动的影响。

在采集到数据之后,通过构建的树形拓扑^[16]网络进行数据传输,本拓扑网络最大可以构成四级通信网,由跟节点、中间父节点和叶节点构成,叶节点自动气象站将采集到

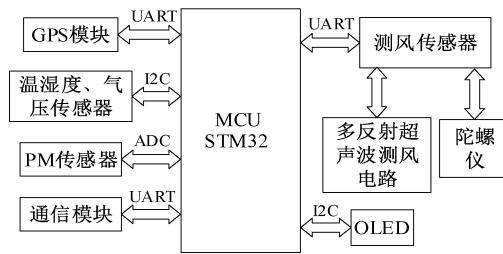


图 1 模块化自动气象站结构

Fig. 1 Modular automatic weather station structure

的数据上报给中间父节点,中间父节点在收到数据之后自动向上转发,最终数据都发送到根结点气象站。根结点气象站同时与无线网络连接,数据发送到 MQTT 服务器^[17],再经过质量控制之后送入数据库,之后通过小区域气象要素分析系统实现对数据的可视化和分析。其网络结构如图 2 所示。

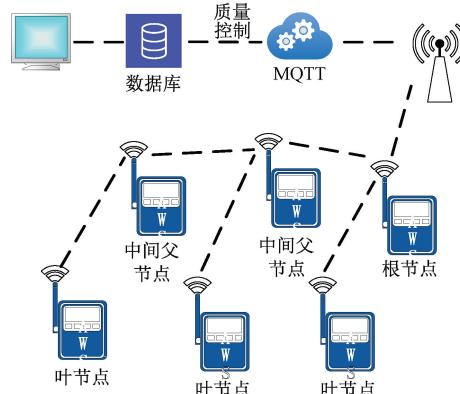


图 2 拓扑网络

Fig. 2 Topological network

2 自动气象站模块化设计

在目前的自动气象站的设计中,为了确保不同测量要素能够在互不干扰的条件下准确测量多种环境参数,需要留出足够空间来安置多个传感器,以提高系统的观测能力和扩展性,这是导致设备体积增大的一个因素^[18]。数字式传感器可以提供精确的数字输出,不仅优化了数据处理流程,还增强了系统对于复杂测量任务的适应性。因此,采用数字式传感器在所设计自动气象站中,有助于简化硬件结构,减少单个组件的体积,同时提升整体测量性能和满足多变观测需求的能力。但是,当前数字式传感器之间其通信协议各不相同,考虑到实际的应用场景,采用 USB-C 接口,在接口每部集成多种通信协议以实现模块间的通信。与传统的接口相比其体积小且内部最多可以有 24 个引脚,可以将多种不同的通信技术融合到该接口中,同时有利于之后其他气象要素的拓展。其内部如图 3 所示。

由图 3 可以看到其内部不但集成了 3.3 V 和 5.0 V 两种不同的电源而且,而且实现了 3 路 UART、1 路 IIC、1 路

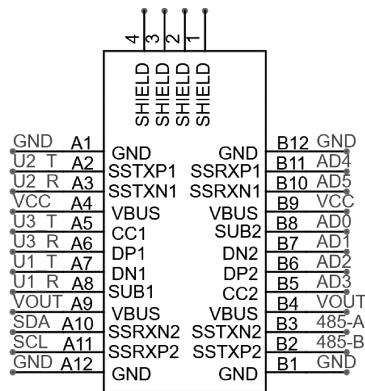


图3 USB-C 接口内部协议

Fig. 3 USB-C interface internal protocol

RS485 和 6 路 ADC 的通信,可以有效地解决由于数字传感器协议不同,同一接口无法实现的问题。为此设计了如图 4 所示的 3 个模块。

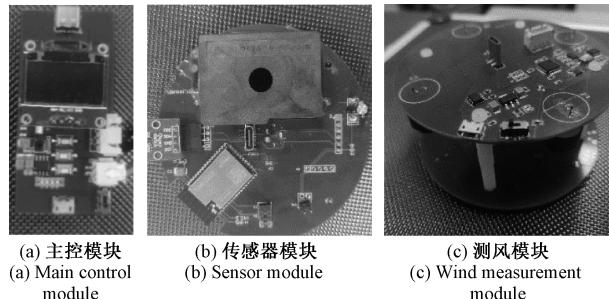


图4 模块化自动气象站硬件

Fig. 4 Modular automatic weather station hardware

模块化实施方案将设计理念划分为 3 大模块:主控模块、传感器模块、测风模块。3 个模块均以 USB-C 接口为基础,在接口中将多种通信协议集成,便于模块间的通信与拓展。

1) 主控模块:该模块采用 STM32 最小系统,以 OLED 屏幕和独立按键组成对采集到的气象要素数据进行处理和显示。同时,引入电源充放电管理电路,采用锂电池,为整个系统提供电能,以提高设备的便携性。

2) 传感器模块:该模块集成了 SHT20 数字温湿度传感器、BMP240 气压传感器、E103-W07 通信模块、GP2Y10 粉尘传感器。

3) 测风模块:由 4 个垂直向下的超声波换能器、STM32 最小系统、USB 转 TTL 电路以及 JY901 S 陀螺仪模块构成,同时外接 CH340 N 芯片实现。实施时,需确保超声波换能器位置准确、陀螺仪模块安装正常,保证风速风向的观测精度以及数据的采集和通信^[19]。

3 测风模块硬件设计

为了满足模块化和小型化的需求设计了测风模块。由 4 个频率为 40 kHz 收发一体式超声波换能器垂直向下组

成,信号通过在上下板之间的多次反射来传输。所设计的测风模型的直径为 120 mm;高为 63 mm;支柱距圆心 55 mm;直径为 8 mm;换能器 A、B、C、D 距圆心 50 mm;上下板之间的距离为 43 mm。针对测风模块的优化和计算是之前做的工作,具体的模型优化在文献[20]中说明。模型如图 5 所示。

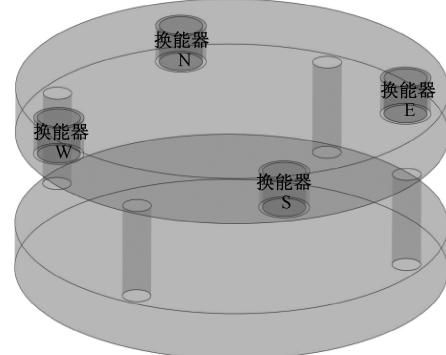


图5 测风传感器模型

Fig. 5 Wind sensor model

由于本设计所采用的超声波换能器其频率 40 kHz,其可以直接通过单片机进行驱动。与 200 kHz 的超声波换能器相比,不需要设计专门的升压电路,其原理如图 6 所示。

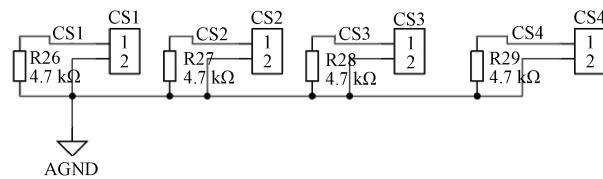


图6 超声波驱动电路

Fig. 6 Ultrasonic drive circuit

同时,为了确保超声换能器和传输线的最佳性能,需要采用匹配电路,使超声换能器的阻抗等于传输线的特性阻抗,减小反射功率从而使换能器的有用功率最大。匹配电阻 R26、R27、R28 和 R29 的大小都为 4.7 kΩ。超声波换能器在发送信号之后,由其余的换能器负责接收信号。信号选通器 RS2255 控制对哪个超声波的接收信号进行调理,其原理如图 7 所示。

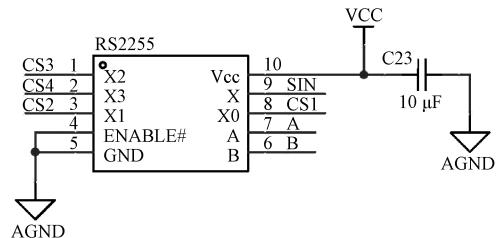


图7 信号选通电路

Fig. 7 Signal gating circuit

引脚 A 和引脚 B 为控制端口,单片机通过发送逻辑电平来实现信号选通。信号在经过选通之后进入超声波信号

调理电路,将超声波换能器所接收的超声波信进行滤波放大。由于已知所接收信号的频率为 40 kHz,因此,设计中心频率为 40 kHz 的带通滤波器来对超声波回波信号进行调理,其具体原理图如图 8 所示。

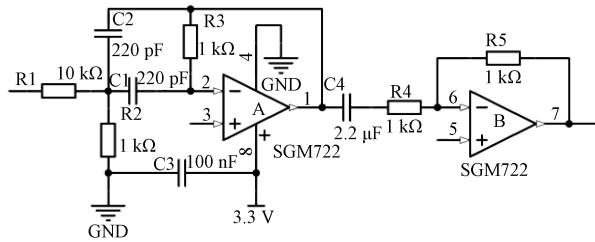


图 8 超声波信号调理电路

Fig. 8 Ultrasonic signal conditioning circuit

在图 8 中,一级电路为反向多路负反馈带通滤波放大电路^[21]。在一级滤波放大电路中 $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 3.9 \text{ k}\Omega$, $R_3 = 110 \text{ k}\Omega$, $C_1 = 220 \text{ pF}$, $C_2 = 220 \text{ pF}$ 。首先由 M 点的基尔霍夫电流定律得到式(1):

$$I_{R_1}(s) = I_{R_2}(s) + I_{C_1}(s) + I_{C_2}(s) \quad (1)$$

然后,代入电压得到式(2):

$$\frac{U_i(s) - U_A(s)}{R_1} = \frac{U_A(s)}{R_2} + (U_A(s) - U_o(s))sC_1 + U_A(s)sC_2 \quad (2)$$

再由理想运放的虚短和虚断,得到式(3):

$$U_A(s)sC_2 = -\frac{U_o(s)}{R_3} \quad (3)$$

联立式(2)和(4)最终得到一级滤波放大电路的传递函数式(4):

$$H(s) = \frac{U_o(s)}{U_i(s)} = -\frac{1}{R_1} \times \frac{s}{\frac{1}{C_2 R_1 R_3} + \frac{1}{C_1 R_2 R_3} + \frac{1}{R_3} \left(\frac{C_1}{C_2} + 1 \right) s + s^2 C_1} \quad (4)$$

其中中心频率 f_0 :

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{\frac{1}{R_1 R_2 R_3 C_1 C_2}}} = 41.178 \text{ kHz} \quad (5)$$

可以看到,该带通滤波器的中心频率与换能器的频率基本匹配。由式(4)可以看到当传递函数分母的二次项和常数项为 0 时可以得到该换能器的放大倍数 A_1 ,既:

$$A_1 = \frac{-R_3}{2 \times R_1} = -5.5 \quad (6)$$

品质因素 Q :

$$Q = \sqrt{\frac{(R_1 + R_2)R_3}{2R_1 R_2}} = 4.46 \quad (7)$$

由于一级电路引入了多路负反馈,因此其放大倍数会比较小,故而需要引入第二级电路来实现对信号的放大。其主要由电阻 R_5 、 R_4 和运算放大器 SGM722 组成。其放

大倍数 A_2 的计算公式为:

$$A_2 = -\frac{R_5}{R_4} = -100 \quad (8)$$

所以,该电路理论的放大倍数 A 为:

$$A = A_1 \times A_2 = 550 \quad (9)$$

同时,为了使得放大后信号尽可能不失真和缩小模块体积和控制成本,本设计采用单电源供电,采用电阻 R_6 、 R_7 进行分压,将运放正端的电压抬升到 1.65 V,以满足信号的不失真。

4 测风算法设计

所设计的测风模块是基于时差法进行测风。超声波时差法利用超声波在介质中传播时,介质的移动速度加载到超声波的速度上,在相同的传播距离内,顺向传播的时间会小于逆向传播的时间^[22]。本设计所选用的超声波换能器在发射时的角度特性如图 9 所示。

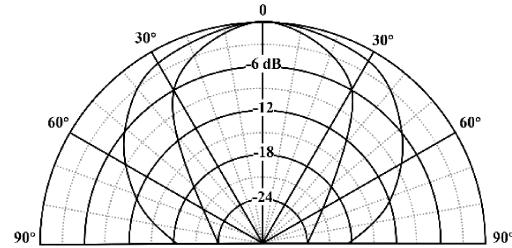


图 9 超声波换能器角度特性图

Fig. 9 Ultrasonic transducer angle characteristic diagram

图 9 中,曲线代表换能器输出的最大强度,曲线向外扩展时,表示超声波强度的降低。由图 9 可以看到在发射信号强度衰减一半(-6 dB)时的角度为 30° ,即该超声波换能器的典型发射角为 30° 。

如图 10 所示,为多次反信号接收原理图,M、N 均为收发一体式的超声波换能器,距离为 L ,与地的高度为 H 。超声波通过上下两个板之间的多次反射来时间传播,超声波换能器 M、N 交替收发信号,测得信号顺风传播的时间 t_{NM} 和逆风传播时间 t_{MN} 。

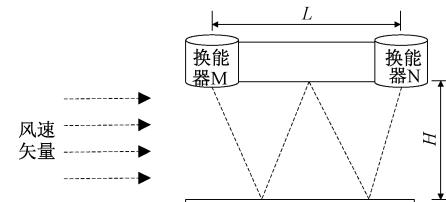


图 10 多次反射测风原理图

Fig. 10 Schematic diagram of multiple reflection wind measurement

假设,风由水平方向 M 到 N,风速为 V ,超声波在 25°C 的环境中超声波的传播速度为 V_0 ,换能器超声波信号的发射方向为 θ ,则此时超声波水平的风速大小:

$$V_x = V_0 \sin\theta \quad (10)$$

由已知的条件可得:

$$\begin{cases} t_{MN} = \frac{L}{V_{MN}} = \frac{L}{V_x + V} = \frac{L}{V_0 \sin\theta + V} \\ t_{NM} = \frac{L}{V_{MN}} = \frac{L}{V_x - V} = \frac{L}{V_0 \sin\theta - V} \end{cases} \quad (11)$$

由式(11)可得水平 NM 方向的风速 V :

$$V = \frac{L}{2} \left(\frac{1}{t_{MN}} - \frac{1}{t_{NM}} \right) \quad (12)$$

在强噪声或强干扰的恶劣环境中,复杂的环境因素导致对超声波传播时间的测量愈发困难,当前的时差法无法满足测量需求。针对这一问题,基于所设计多反射超声波测风阵列,提出了改进的自适应滤波算法,对超声波的延时信号进行预处理^[23]。

由于本算法基于多反射超声波测风原理基于时差法^[24],所以需要测量出超声波信号从发射到接收的时间。在所设计的多反射超声波测风阵列中,当 1 个超声波换能器发射时,其余 3 个换能器均能接收到信号,因此可以测得 12 组时间信号。

受到多种环境因素的干扰,在无风时其信号接收的时间也会产生波动,从而降低测量精度。为了降低干扰提高测量精度,使用变换窗的 LMS 自适应滤波算法^[25]对超声波时间信号进行预处理。传统的 LMS 算法的窗体宽度为固定的,若窗体过小则无法有效滤除干扰,若窗体宽度过大,则会损失信号特征。本文引入窗体宽度系数 ∂ ,来调节窗体的大小^[26]。其滑动窗口的长度为 $M' = \lfloor \partial M \rfloor$, M 为原始窗口的大小。 ∂ 由上一个时刻的风速大小来决定,通过调节窗体的宽度,使得窗口大小可以动态变化。 x_n 表示 n 时刻超声波信号的传输时间。在 n 时刻,窗口内的数据为 $\mathbf{X}_n = [x(n), x(n-1), \dots, x(n-M'+1)]^T$ 。首先,定义滤波器的权重向量 $\mathbf{W}(n)$,其初始值为零向量。滤波器输出 $\mathbf{Y}(n)$ 为:

$$\mathbf{Y}(n) = \mathbf{W}^T(n) \mathbf{X}_n \quad (13)$$

则,期望 $\mathbf{D}[n]$ 与输出 $\mathbf{Y}[n]$ 的误差 $\mathbf{e}[n]$ 为:

$$\mathbf{e}[n] = \mathbf{D}[n] - \mathbf{Y}[n] \quad (14)$$

然后,通过代价函数 $J(n)$,依据当前时刻误差 $\mathbf{e}(n)$ 对下一时刻的权重 $\mathbf{W}(n+1)$ 进行优化,如式(15)所示。

$$J(n) = \frac{1}{M'} \sum_{i=0}^{M'-1} \mathbf{e}^2(n-i) \quad (15)$$

为了最小化 $J(n)$,采用梯度下降法来更新滤波器。计算滤波器的系数向量 $\mathbf{W}(n)$ 的梯度:

$$\frac{\partial J(n)}{\partial \mathbf{W}} = \frac{\partial}{\partial \mathbf{W}} \frac{1}{M'} \sum_{i=0}^{M'-1} \mathbf{e}^2(n-i) \quad (16)$$

将式(14)和(15)带入式(16)得到:

$$\frac{\partial J(n)}{\partial \mathbf{W}} = \frac{\partial}{\partial \mathbf{W}} \left(\frac{1}{M'} \sum_{i=0}^{M'-1} (\mathbf{D}(n-i) - \mathbf{W}^T(n) \mathbf{X}(n-i))^2 \right) \quad (17)$$

考虑到计算效率和系统的实时性,采用近似梯度更新权重,如式(18)所示。

$$\frac{\partial J(n)}{\partial \mathbf{W}} \approx -2x(n)\mathbf{e}(n) \quad (18)$$

最后,将新的权重系数 $\mathbf{W}(n+1)$ 更新:

$$\mathbf{W}(n+1) = \mathbf{W}(n) + \frac{2\mu}{M'} \sum_{i=0}^{M'-1} e(n-i)x_{n-i} \quad (19)$$

式中: μ 为步长参数,它决定了学习率或权重调整的幅度^[27]。然后,将滤波结果 $y(n)$ 保存。对所有信号传播时间进行滤波之后,得到第 i 时刻滤波后的信号传播时间数据 $\mathbf{Y}_i = [y_{(i)(1)}, y_{(i)(2)}, \dots, y_{(i)(12)}]$ 。然后,通过时差法来计算出当前的风速和风向。由时差测风法^[28]原理,得到第 i 时刻的相邻超声波换能器之间的风速表达式:

$$\begin{cases} V_{NE} = \frac{L_0}{2} \left(\frac{1}{t_{NE}} - \frac{1}{t_{EN}} \right) \\ V_{NW} = \frac{L_0}{2} \left(\frac{1}{t_{NW}} - \frac{1}{t_{WN}} \right) \\ V_{WS} = \frac{L_0}{2} \left(\frac{1}{t_{WS}} - \frac{1}{t_{SW}} \right) \\ V_{ES} = \frac{L_0}{2} \left(\frac{1}{t_{ES}} - \frac{1}{t_{SE}} \right) \end{cases} \quad (20)$$

式中: $t_{NE}, t_{EN}, t_{NW}, t_{WN}, t_{WS}, t_{SW}, t_{SE}, t_{SE}$ 为相邻换能器超声波传播的时间。通过,对两个方向的风进行矢量合成可以得到当前的风速 V_1 和风向 α_1 :

$$\begin{cases} V_x = \frac{V_{NW} - V_{WS}}{2} \\ V_y = \frac{V_{NW} - V_{ES}}{2} \\ V_1 = \sqrt{V_x^2 + V_y^2} \\ \alpha_1 = \arcsin \frac{V_x}{V_1} \end{cases} \quad (21)$$

由对角的两组换能器得到另一组测风结果,如式(22)所示。

$$\begin{cases} V_{NS} = \frac{\sqrt{2}L_0}{2} \left(\frac{1}{t_{NS}} - \frac{1}{t_{SN}} \right) \\ V_{WE} = \frac{\sqrt{2}L_0}{2} \left(\frac{1}{t_{WE}} - \frac{1}{t_{EW}} \right) \end{cases} \quad (22)$$

式中: $t_{NS}, t_{SN}, t_{WE}, t_{EW}$ 为超声波传播的时间。对其进行矢量合成得到 V_2 和 α_2 ,得到:

$$\begin{cases} V_2 = \sqrt{V_{NS}^2 + V_{WE}^2} \\ \alpha_2 = \arcsin \frac{V_{WE}}{V_2} + 45^\circ \end{cases} \quad (23)$$

在得到两组换能器的测风结果之后,为了消除圆柱绕流^[29]对测风路径的干扰,将对角和相邻测风结果进行加权^[30],从而得到最终的测风结果。第 i 时刻的权重系数 w_i 的计算公式为:

$$\begin{cases} w_i = \frac{\alpha_{i-1} - o \times 45}{45}, o \text{ 为偶数} \\ w_i = 1 - \frac{\alpha_{i-1} - o \times 45}{45}, o \text{ 为奇数} \end{cases} \quad (24)$$

式中: α_{i-1} 为上一时刻的风向角, $o = \lfloor \frac{\alpha_{i-1}}{45} \rfloor$, 最后将电子罗盘航向角 yaw 和风向相融合得出最终的风速和风向:

$$\begin{cases} V = V_1 \times w_i + V_2 \times (1 - w_i) \\ \alpha = yaw + (\alpha_{(i)1} \times w_i + \alpha_{(i)2} \times (1 - w_i)) \end{cases} \quad (25)$$

5 实验

5.1 超声波信号调理电路验证实验

首先, 对超声波信号调理电路的性能进行验证, 实验基于上述电路的原理图。在幅值为 3 mV 频率 40 kHz 的正弦信号上叠加一个 10 mV 的噪声信号, 经过第一级的多路负反馈有源滤波放大电路和第二级的反向放大电路。具体实验结果如图 11 所示。

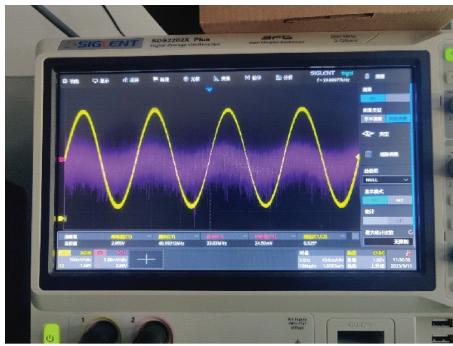


图 11 信号调理电路测试图

Fig. 11 Signal conditioning circuit test diagram

图 11 中, 幅值较小且混有噪声的为输入信号, 幅值较大并且显示清晰为滤波后的信号。通过对示波器的观察, 发现通滤波放大电路可以完好的筛选出频率为 40 kHz 的正弦信号, 且不发生相移。由示波器显示可得调理后的信号幅值 2.8 V, 因此该电路在对频率 40 kHz 的超声波信号实际放大倍数 $A = 2.8 \text{ V}/0.006 \text{ V} \approx 467$ 。实际放大倍数与理论放大倍数有一些差距, 可能是因为所选用电容电阻的精度没有达到要求, 以及滤波器中心频率为 41.178 kHz, 与超声波换能器的中心频率仍有一定偏差。

接下来, 计算带通滤波器在中心频率附近的信号增益, 实验用幅值为 3 mV 的正弦信号通过信号调理电路, 得到滤波后的信号波形及幅值。增益 K 计算如式(26)所示。

$$K = 20 \lg \left(\frac{V_o}{V_i} \right) \quad (26)$$

式中: V_i 为输入信号, V_o 为输出信号, 通过求其 30 ~ 50 kHz 的增益得到如图 12 所示的曲线图。

图 12 中, 横轴表示信号频率单位为 kHz, 纵轴表示信号增益(单位为 dB), 可以看出信号的中心频率为 40 kHz 左右, 且在 40 kHz 左右其增益最大约为 53.79 dB。其中心频率的额误差主要由于电路中电容和电阻的精度所造成的。为了进一步验证所设计滤波器的对频率的筛选特性, 对原始超声波的回波信号进行快速傅里叶变换得到其频谱

图, 如图 13 所示。

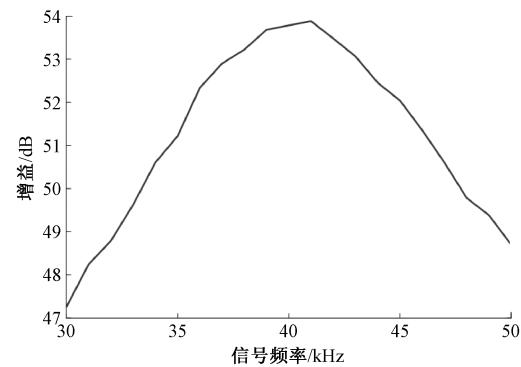


图 12 30~50 kHz 信号增益

Fig. 12 30~50 kHz signal gain

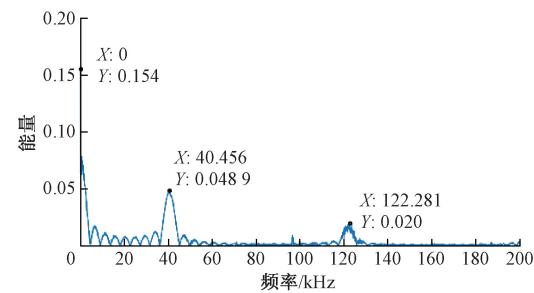


图 13 超声波原始回波信号频谱图

Fig. 13 Spectrum of ultrasonic raw echo signal

由图 13 可以发现, 原始回波信号存在多个频率分量, 主要为 0 Hz 的直流信号和 40 kHz 原始回波信号以及 122 kHz 的噪声信号, 且在 40 kHz 信号周围仍然有多个较小的其他频率的信号分量, 同时, 40 kHz 信号的能量很低约为 0.049。接下来, 对经过信号调理电路的回波信号进行快速傅里叶变换, 其结果如图 14 所示。

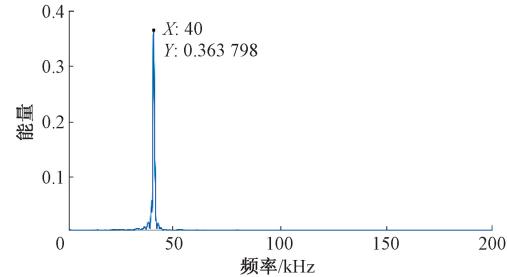


图 14 调理后信号频谱图

Fig. 14 Spectrum of the signal after conditioning

由图 14 可知, 在经过信号调理后, 0 ~ 200 kHz 的区间内仅有一个 40 kHz 的频率分量, 其能量约为 0.36 与调理前的信号相比有显著提升。

为了对观察超声波回波信号的特征, 通过单片机发送 8 个占空比为 50%, 频率为 40 kHz 的脉冲信号, 进行对角换能器一组超声波信号收发实验。回波信号在经过信号调理电路后其波形如图 15 所示。

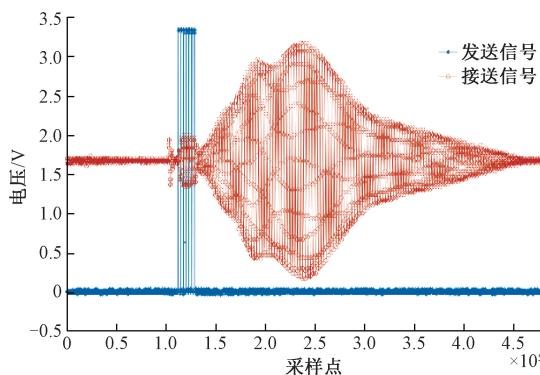


图 15 一组超声波信号发射和接收

Fig. 15 A set of ultrasonic signal transmission and reception

由图 15 看到,发射端超声波换能器发射 8 个幅值为 3.3 V 频率为 40 kHz 的超声波脉冲后,信号从发射到到达第一个峰值经过了 1 175 μ s,经过计算,超声波信号在该测风区域的传播距离为 40.26 cm,与设计基本相符。同时,由图 15 可知由于多径效应的影响使得信号会产生多个波峰,这将对超声波由发射到接收时间的信号产生影响。为了降低这种影响,在软件上仅检测第一个波峰到达所需要的时间。由于信号在传播过程中会产生衰减,因此对角换能器所接受的信号强度必然小于相邻的换能器,为了保证所接受信号的幅值尽可能一致,通过调节发射信号的脉冲个数来实现。本文设置了邻角发送超声波脉冲的个数为 6,对角超声波发送的脉冲个数为 8。

5.2 改进自适应滤波算法验证实验

为了验证改进 LMS 自适应滤波算法的性能,对滤波前后的时间变化量进行分析,如图 16 所示。纵轴表示时间单位为 0.01 ms,横轴表示采样点,蓝线代表超声波信号由换

能器 N 发送到换能器 S 接收时间的变化量;红线代表超声波信号由换能器 S 发送到换能器 N 接收时间的变化量,变化量为实时信号由发送到接收时间与无风时固定发送时间的差值,通过单片机采集计算得出。前 1 000 多个数据点在无风环境中的采集得到,然后,在一个方向为 S 到 N,风速由 0~5 m/s 且逐渐增大的风场中采集得到之后的数据点。

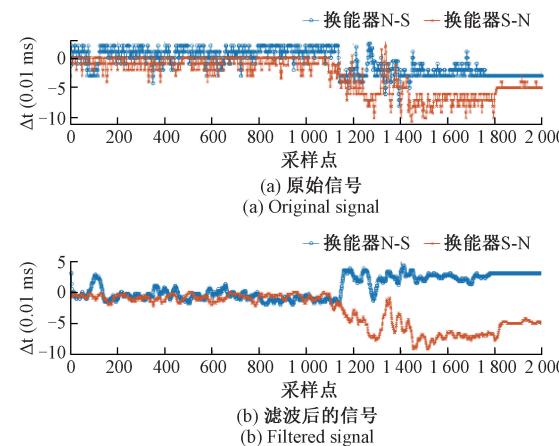


图 16 滤波前后波形图

Fig. 16 Waveforms pre-and post-filtering

由图 16 可以看到,改进 LMS 滤波算法既保留了大部分信号特征又降低了环境干扰。表明了改进的 LMS 自适应滤波算法对环境噪声具有较强的抑制效果。

分析改进 LMS 自适应滤波算法与传统 LMS 自适应滤波算法的性能。分别计算 12 条测风路径在 1 min 内的时差之和,采用传统 LMS 自适应滤波算法和改进的 LMS 自适应滤波算法分别对原始信号进行处理,实验结果如表 1 所示。

表 1 传统 LMS 算法与改进 LMS 算法所有路径总接收时间变化量

Table 1 Total receiving time of each path before and after filtering

算法	NE	EN	NW	WN	WS	SW	SE	ES	NS	SN	WE	EW
原始信号	16 668	42 153	1 191	10 410	15 410	2 031	12 420	8 074	13 054	20 147	23 417	15 321
传统 LMS	5 556	22 793	340	6 940	4 059	711	9 502	4 019	6 025	11 511	9 048	4 106
改进 LMS	3 030	14 051	185	4 213	5 490	498	6 376	3 129	2 811	7 265	7 845	2 170

通过表 1 数据可以看出,在经过改进 LMS 自适应滤波算法后,所测得时间差有明显降低。对实验结果进行量化分析,求两组数据改进前后的 RMSE。最终发现,改进 LMS 自适应滤波相比传统 LMS 自适应滤波算法的 RMSE 降低了 27.6%,表明了改进 LMS 自适应滤波算法能够有效抵抗环境干扰,提高测量的精确度。

5.3 温湿压 4 h 观测连续

本实验将所设计的模块化自动气象站在放置于户外进行 4 h 连续观测,分别采集温度、湿度和气压 3 个气象要素,每分钟上报一次,地点位于南京信息工程大学气象观

测场。将所采集到的数据与地面自动气象站 DZZ4 的数据进行比较。实验结果如图 17 所示。

图 17 显示了温度、湿度和气压 3 个气象要素,随时间变化的趋势图。图 17 中标‘*’线表示 DZZ4 的观测结果,标‘○’表示所设计的模块化自动气象站的测结果。可以初步观察到,两组温度数据变化相对稳定。温度范围在 24°C~25.5°C,两组趋势线的变化模式极为相似,显示出高度的线性一致性。相对湿度在 95% 波动,虽然存在一些小的波动,但两组数据的整体趋势保持同步,表明了相对湿度在不同条件下变化的一致性。气压在一开始有着显

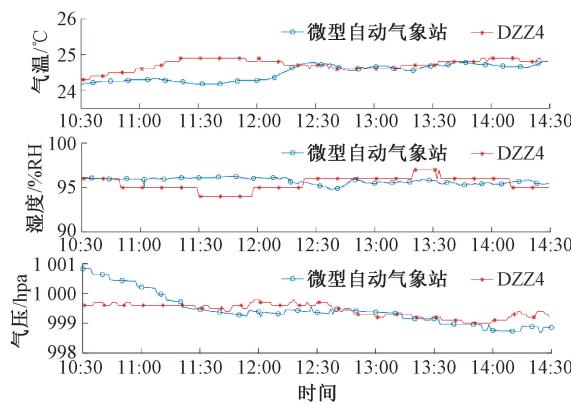


图 17 气象要读连续观测结果

Fig. 17 Meteorological reading of continuous observation results

著的差异,但是其观察其趋势发现出两组数据紧密跟

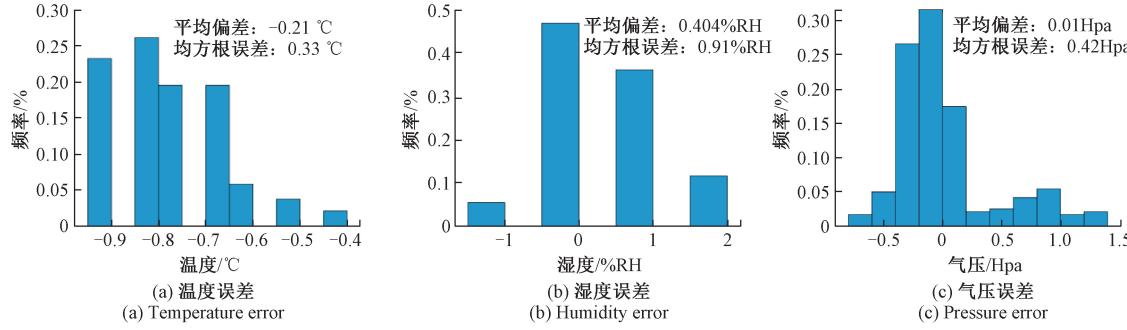


图 18 温湿压误差分析

Fig. 18 temperature, humidity, and pressure error analysis

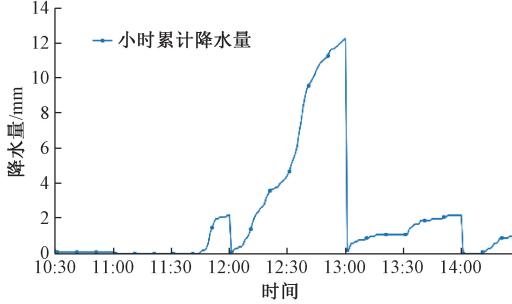


图 19 小时累计降水量

Fig. 19 Hourly accumulated precipitation

由图 19 可知,相对湿度高但相对稳定,表明空气中的水分含量高,这为降水提供了充足的水汽。然而,如果降水量实际上较小,则意味着尽管环境湿度高,但并没有足够的上升气流或其他天气动力来触发大规模的降水。温度的稳定性意味着降水事件没有显著影响该地区的温度,这与降水量较小的情况相符。气压的轻微下降趋势仍然表明了低压系统的接近,但这种低压可能没有产生预期的大量降水。通过分析,表明该地区经历了一次较轻的降水事件,与相对湿度高和气压轻微下降的观测数据相一致。

随,几乎以相同的速率下降,这表明出两个测量点受到相同大气压力变化的影响。为了更全面地评估测量准确度是否达到业务规定的要求,采用误差分布图来对测量结果进行分析,其结果如图 18 所示。

图 18 中,横坐标分别为温度、湿度和气压的测量误差,纵轴为其出现次数。由温度的误差分布图直方图可以看出,其误差集中在 $-0.2^{\circ}\text{C} \sim 0.2^{\circ}\text{C}$,最大误差为 0.7°C ,大部分温度观测与实际值接近,误差很小;湿度观测的准确性较温度观测稍差,分布更宽,集中在 $-1\% \sim 1\%$,最大误差达到 2% ;气压观测的高准确性观测具有较高的准确性,气压的误差分布大部分集中在 $-0.5 \sim 1.5 \text{ hPa}$,其最大误差为 1.4 hPa 。本设计所使用的传感器均为数字式,而 DZZ4 自动气象站传感器为模拟式,数据采集、放大、转换过程中引入的噪声和干扰,会影响最终的测量结果。进一步结合当时的小时累计降水量进行相关性分析,具体结果如图 19 所示。

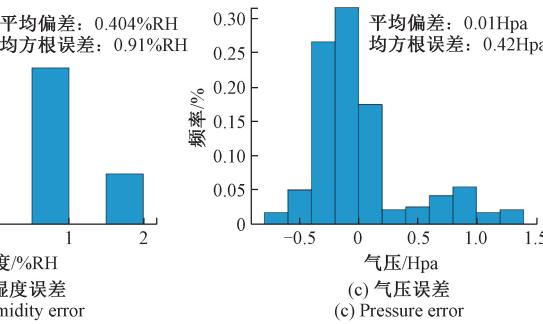


图 19 小时累计降水量

5.4 测风模块测量验证实验

由于实验条件有限,使用自制的小型风洞和风速计 AR856 进行测试。通过改变鼓风机的档位来调节风速,通过旋转鼓风机和风洞来改变风向。风洞的尺寸为 $30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$,长度为 80 cm ,前端铺满细管使风的流动更加平稳。标定仪器是型号为 AR856 的叶轮式风速仪,其相关性能参数如表 2 所示,满足本系统标定的需求。

表 2 AR856 性能参数

Table 2 AR856 performance parameters

性能参数	参数值
风速测量范围/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	0 ~ 45
风速测量误差/%	±3
分辨率/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	0.1

通过所设计的上位机来接收所测量的风速和风向数据,具体实验结果如表 3 所示。

根据表 3 可知,所设计的手持自动气象站测风模块的实测数据和标准数据相比,在低风速较低时有所偏差,最大相对误差在 9.33% 。风速的最大误差为 0.28 m/s 。实测风向角与标准风向角相比,相对误差较小,最大在

11.78%，风向角度的最大误差为 4.8° ，与预期的要求仍然有一定差距。

表3 风速风向测量结果

Table 3 Wind speed and direction measurement results

实验	风速	风速	风速绝	风向	风向	风向绝
	标准值/ (m·s ⁻¹)	测量值/ (m·s ⁻¹)	对误差/ (m·s ⁻¹)	标准值/ (°)	测量值/ (°)	对误差/ (°)
1	3.1	3.24	0.14	90	85.7	4.3
2	3.0	3.28	0.28	45	46.9	1.9
3	3.2	3.12	0.08	30	33.4	3.4
4	4.9	4.77	0.13	90	94.8	4.8
5	5.1	5.26	0.16	45	47.2	2.2
6	5.0	5.09	0.09	30	26.4	3.6
7	10.1	10.25	0.15	90	93.4	3.4
8	9.9	9.81	0.09	45	47.5	2.5
9	10.2	10.13	0.07	30	34.1	4.1
10	14.9	15.16	0.26	90	92.4	2.4
11	15.1	15.20	0.10	45	48.1	3.1
12	15.3	15.23	0.07	30	32.7	2.7
13	20.1	20.24	0.14	90	46.9	1.9
14	20.1	20.29	0.19	45	49.4	4.4
15	20.0	19.73	0.27	30	33.9	3.9

然后，在户外对风速和风向进行四小时连续观测，通过对比超声波式测风仪、风杯式测风仪和缩合剂自动气象站的测风模块，来验证所设计的测风模块的性能，结果如图20所示。

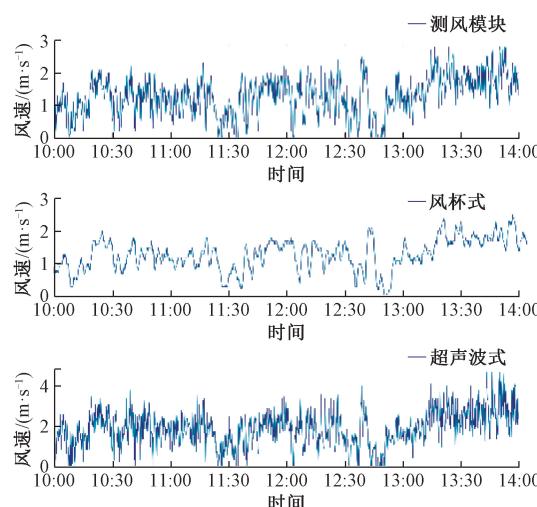


图20 3个测风传感器4小时连续采样

Fig. 20 Continuous sampling of three wind sensors for 4 hours

由图20可以看出所设计的测风模块的测量结果与另外两个相比，虽然有所偏差，但整体趋势和风速大小基本一致，仍在可控范围之内，实验测得所设计的测风模块其

平均误差为 0.68 m/s ，故所得的实测数据较为可靠，但相比于当前高精度测风传感器仍有一定的差距。可能是由于传感器灵敏度、环境干扰(如湍流)、安装位置及数据处理算法等因素的影响。

6 结论

本文基于模块的思想设计了一种便携的多要素模块化微型自动气象站，其功耗为 1.25 W 可连续工作 5.3 h ，实现现场对温度、湿度、气压、PM、风速和风向的六要素观测。相比于当前的自动气象站其体积小安装简单，只需要进行3个模块的连接。通过对数字传感器的温湿压误差的全面分析，验证了其满足观测要求。采用多路负反馈电路设计的测风模块其测速的最大相对误差为 14.8% ，测角的相对误差为 11.78% ，虽然与目前的高精度测风传感器相比仍有一定的差距，但是其体积小，价格低，有利于气象观测的大众化。但是，目前所设计的自动气象站缺少对土壤和雨量的采集，需要设计相应的模块使得其功能更加的全面，同时，我国幅员辽阔地形众多，所设计的微型自动气象站目前不能够在极端的天气下正常的工作，以及超声波测风受温度和PM影响较大，故而会造成测量结果产生较大的偏差，这些需要在之后的工作中来完成。

参考文献

- [1] 喻迎春,王妍婕,万昕成.基于微信的气象灾害预警信息精准智能推送技术的实现[J].气象科技,2020,48(2):195-199.
YU Y CH, WANG Y J, WAN X CH. Realization of accurate intelligent early warning push technology based on WeChat [J]. Meteorological Science and Technology, 2020, 48(2): 195-199.
- [2] 行鸿彦,张金玉,徐伟.地面自动气象观测的技术发展与展望[J].电子测量与仪器学报,2017,31(10):1534-1542,1533.
XING H Y, ZHANG J Y, XU W. Development and prospect of automatic meteorological observation technology on the ground [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31 (10): 1534-1542, 1533.
- [3] 余万明,叶成志,杨晓武,等.地面“云能天”自动化观测进展[J].气象科技进展,2022,12(5):19-26.
SHE W M, YE C H ZH, YANG X W, et al. Current situation and development trend of automatic weather observation system for cloudy, visibility and weather phenomena [J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 2022, 12(5): 19-26.
- [4] 孟昭辉,李庆军.自动气象站综述[J].气象水文海洋仪器,2009,26(4):4.
MENG ZH H, LI Q J. Review of automatic weather

- sration[J]. Meteorological, Hydrological and Marine Instruments, 2009, 26(4):4.
- [5] 许兵甲, 黄飞龙. 基于物联网的智能自动气象站设计[J]. 广东气象, 2022, 44(4):74-76.
- XU B J, HUANG F L, Design of intelligent automatic meteorological station based on internet of things[J]. Guangdong Meteorology, 2022, 44(4):74-76.
- [6] 黄飞龙, 谭晗凌, 霍亚. 物联网与自动气象站深度融合方法研究[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(3): 217-221.
- HUANG F L, TAN H L, HUO Y. Research on deep fusion method of internet of things and automatic weather station [J]. Computer Measurement and Control, 2022, 30(3):217-221.
- [7] 宋树礼, 陈冬冬, 王柏林. 基于 ZigBee 协议地面气象观测原型站无线传输系统设计[J]. 气象科技, 2021, 49(1):144-147.
- SONG SH L, CHEN D D, WANG B L. Design of wireless transmission system for ground meteorological observation prototype station based on ZigBee protocol [J]. Meteorological Science and Technology, 2021, 49(1):144-147.
- [8] 张李元, 左少华, 江锦春. 基于 NB-IoT 技术的小型自动气象站监测系统设计[J]. 气象科技, 2020, 48(6): 816-822.
- ZHANG L Y, ZUO SH H, JIANG J CH. Design of small automatic weather station monitoring system base on NB-IoT technology[J]. Meteorological Science and Technology, 2020, 48(6):816-822.
- [9] 刘小钢. 便携式自动气象站现场移动校准平台的设计与应用[J]. 国外电子测量技术, 2019, 38(4):125-131.
- LIU X G. Design and application of mobile field calibration platform for portable and automatic weather station[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2019, 38(4):125-131.
- [10] 涂爱琴, 于帅, 刘彬, 等. 区域自动气象站远程控制和实景监控系统的设计与实现[J]. 气象水文海洋仪器, 2023, 40(2):113-116.
- TU AI Q, YU SH, LIU B, et al. Design and realization of remote control and real scene monitoring system for regional automatic meteorological station [J]. Meteorological, Hydrological and Marine Instruments, 2023, 40(2):113-116.
- [11] 敖振浪, 刘艳中, 敖进华. 自动气象站多功能电源的设计[J]. 国外电子测量技术, 2017, 36(2):18-22,33.
- AO ZH L, LIU Y ZH, AO J H. Design of multifunctional power supply for automatic weather station [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2017, 36(2):18-22,33.
- [12] 范鹏程, 曹烤, 王大旺, 等. 基于 STM32 自动气象站监测系统设计[J]. 气象研究与应用, 2018(2):82-85.
- FAN P CH, CAO K, WANG D W, et al. The automatic weather station monitoring system based on STM32[J]. Journal of Meteorological Research and Application, 2018(2):82-85.
- [13] 甘志强, 高涛, 匡昌武, 等. 区域自动气象站多传感器冗余观测技术设计与实现[J]. 电子测量技术, 2022, 45(5):33-38.
- GAN ZH Q, GAO T, KUANG CH W, et al. Design and implementation of multi-sensor redundant observation technology in regional automatic weather station[J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(5):33-38.
- [14] BERNARDES G F L R, ISHIBASHI R, IVO A A S, et al. Prototyping low-cost automatic weather stations for natural disaster monitoring[J]. Digital Communications and Networks, 2023, 9(4):941-956.
- [15] KUSRIYANTO M, PUTRA A A. Weather station design using IOT platform based on arduino mega[C]. 2018 International Symposium on Electronics and Smart Devices(ISESD). IEEE, 2018: 1-4.
- [16] 刘俊, 周红根, 刘新安, 等. 江苏北部龙卷雷达组网探测策略[J]. 气象科技, 2021, 49(2):157-165.
- LIU J, ZHOU H G, LIU X AN, et al. Observation strategy of tornado radar network in Northern Jiangsu[J]. Meteorological Science and Technology, 2021, 49(2):157-165.
- [17] 韩同欣, 何文春, 吴鹏, 等. 气象基础设施云平台关键设计与实现[J]. 气象科技, 2022, 50(2):290-296.
- HAN T X, HE W CH, WU P, et al. Key design and implementation of cloud platform for meteorological infrastructure [J]. Meteorological Science and Technology, 2022, 50(2):290-296.
- [18] 王明辉, 陈冰怀, 黄海莹, 等. 自动气象站常规传感器现场检测系统设计[J]. 气象科技, 2019, 47(3):402-407.
- WANG M H, CHEN B H, HUANG H Y, et al. Design of detection system for regular Sensors of automatic weather stations[J]. Meteorological Science and Technology, 2019, 47(3):402-407.
- [19] 刘杰, 楚志刚. 川藏地区及川藏铁路沿线风场特征分析[J]. 气象科技, 2023, 51(1):142-148.
- LIU J, CHU ZH G. Analysis of wind field in Sichuan-Tibet area and along Sichuan-Tibet railway [J]. Meteorological Science and Technology, 2023, 51(1): 142-148.
- [20] 李浩琪, 行鸿彦, 王水璋, 等. 多反射式超声波测风模型及

- 算法研究[J].电子测量与仪器学报,2023,37(9):110-118.
LI H Q, XING H Y, WANG SH ZH, et al. Multi-reflection Ultrasonic wind measuring model and algorithm research [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37 (9): 110-118.
- [21] 贾文水,王仁宝,郭立全.多路负反馈二阶带通滤波电路及其Multisim仿真验证[J].物联网技术,2018,8(1):2.
JIA W SH, WANG R B, GUO L Q. Multi channel negative feedback second-order bandpass filtering circuit and its Multisim simulation verification [J]. Internet of Things Technologies, 2018,8(1):2.
- [22] 王大为,王召巴,陈友兴,等.基于双高斯衰减模型的超声回波处理方法[J].物理学报,2019,68(8):168-176.
WANG D W, WANG ZH B, CHEN Y X, et al. Ultrasonic echp processing method base on dual-Gaussian attenuation model[J]. Acta Physica Sinica, 2019,68(8):168-176.
- [23] 陈泳,田金鹏,刘燕平.一种新的变步长LMS自适应滤波算法[J].电子测量技术,2015(4):5.
CHEN Y, TIAN J P, LIU Y P. New variable step size LMS adaptive filtering algorithm [J]. Electronic Measurement Technology, 2015(4):5.
- [24] 李琦,魏永星,刘倾,等.基于时差法超声测风系统的声场分析与研究[J].海洋技术学报,2016,35(1):68-73.
LI Q, WEI Y X, LIU J, et al. Analysis and research on the acoustic field of the ultrasonic wind measurement system based on the time difference method [J]. Journal of Ocean Technology, 2016,35(1):68-73.
- [25] GU Y T, JIN J, MEI SH L. L_0 norm constraint LMS algorithm for sparse system identification[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2009, 16(9): 774-7.
- [26] 杨武. LMS自适应滤波器优化设计与仿真分析[D].长春:吉林大学,2017.
YANG W. Optimization design and simulation analysis of LMS adaptive filter[D]. Changchun: Jilin University, 2017.
- [27] 姚子扬,尚俊娜,孙建强,等.一种多源融合室内外无缝定位方法[J].传感技术学报,2022(1):035.
YAO Z Y, SHANG J N, SUN J Q, et al. A multi-source fusion indoor and seamless positioning method[J]. Journal of Transduction Technology, 2022(1):035.
- [28] 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.
REN X Y, CHEN X, GUO Y. Study on the influence of ultrasonic wind transducer on wind speed [J]. Electronic Measurement Technology, 2019,42(7):118-124.
- [29] 黄哲,韩路杰,金茹,等.浙江天目山区台风暴雨特征和成因分析[J].气象科技,2022,50(6):812-821.
HUANG ZH, HAN L J, JIN R, et al. Analysis of characteristics and causes of typhoon rainstorms in Tianmu Mountain Area of Zhejiang[J]. Meteorological Science and Technology, 2022,50(6):812-821.
- [30] 唐勇,钟都都,左乐.多径效应对被动测向系统的影响分析[J].电子信息对抗技术,2019,34(6):10-13,31.
TANG Y, ZHONG D D, ZUO L. Analysis of multi-path effects on passive direction-finding systems[J]. Electronic Information Warfare Technology, 2019, 34 (6): 10-13,31.

作者简介

行鸿彦(通信作者),教授,博士生导师,主要研究方向为微弱信号检测与处理、智能化电子测量技术与仪器等。

E-mail:xinghy@nuist.edu.cn

李浩琪,硕士,主要研究方向为大气探测技术与仪器等。

E-mail:772541780@qq.com