

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2007195

基于双阵元超声波接收阵列的风矢量测量*

单泽彪^{1,2,3}, 刘小松¹, 鲁胜麟¹, 史红伟¹

(1. 长春理工大学电子信息工程学院 长春 130022; 2. 长春气象仪器研究所 长春 130102;
3. 吉林大学通信工程学院 长春 130022)

摘要:针对当前超声波测风仪测量精度不高及抑制噪声干扰能力不强的问题,提出了一种双阵元超声波接收阵列结构及基于该结构的风矢量测量方法。首先,设计了一种基于超声波测风原理的风速风向测量系统结构,该结构中包含一个超声波发射阵元和两个超声波接收阵元;然后,依据该系统结构给出了一种基于相关方法的超声波时延估计算法,根据超声波传输时间与风矢量之间的关系可直接获得风速风向值。最后,通过仿真实验对所提方法的可行性与有效性进行了验证,且通过搭建的双阵元超声波阵列测风系统对所提方法进行了实测数据验证。实验结果表明:设计的结构简单易实现,算法稳定计算复杂度低,并且具有较高的噪声抑制能力。实测环境下风速测量的最大相对误差为2.3%、风向角测量的最大测量误差为 -1.5° ,基本达到了风矢量测量仪的技术要求。

关键词:风矢量测量;超声波传感器;双阵元;相关检测;时延估计

中图分类号: TH765 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Wind vector measurement using dual sensors ultrasonic receiving array

Shan Zebiao^{1,2,3}, Liu Xiaosong¹, Lu Shenglin¹, Shi Hongwei¹

(1. School of Electronic and Information Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China; 2. Changchun Meteorological Instrument Research Institute, Changchun 130102, China; 3. College of Communication Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: To improve the property of measuring accuracy and noise suppression of the current ultrasonic anemoscope, a measurement method of wind vector is proposed, which is based on the structure of ultrasonic receiving array with dual sensors. Firstly, a structure of wind speed and direction measurement system is designed by using the principle of ultrasonic wind measurement. It consists of an ultrasonic transmitting sensor and two ultrasonic receiving sensors. Then, an ultrasonic time delay estimation algorithm based on the correlation detection is proposed. The wind speed and direction can be obtained directly via the relation between ultrasonic transmission time and wind vector. Finally, the feasibility and effectiveness of the proposed method are evaluated by several simulation experiments. The actual measured data are also utilized through establishing a wind measurement system with dual-sensor ultrasonic array. Experimental results show that the proposed method has the advantages of simple structure, stable algorithm, low computational complexity and good noise suppression performance. The practical test experiments show that the maximum relative error of wind speed measurement is 2.3%, and the maximum error of wind direction angle measurement is -1.5° . The technical requirements of wind vector measuring instrument can be meet basically.

Keywords: wind vector measurement; ultrasonic sensor; dual elements array; correlation detection; time delay estimation

收稿日期:2020-12-03 Received Date: 2020-12-03

* 基金项目:国家自然科学基金(61571462)、吉林省教育厅科学技术项目(JJKH20190590KJ, JJKH20190591KJ)、长春理工大学青年科学基金(XQNJJ-2017-12)项目资助

0 引 言

风矢量测量在气象、军事、电力、工业、航海、航空以及科学试验等领域具有广泛的应用^[1-4]。常用的测风仪器主要有机械式测风仪、热敏式风速计、激光多普勒测风仪^[5]和超声波测风仪^[6]等。其中超声波测风仪以其结构简单、无启动风速限制、测量范围广、测量精度高、维护成本较低等诸多优势,已成为当前测风领域中的主流产品。超声波风矢量测量的方法主要有多普勒法、涡街测量法与时差法等^[7]。其中多普勒法与涡街测量法由于原理的限制,对广阔范围内的风速风向进行测量时具有一定的局限性,所以在实际超声波测风仪中应用时差法原理的最为普遍广泛。时差法即是利用超声波在风场的影响下到达时间的不同而进行风速风向的测量的。因此,超声波风矢量测量的精度就完全取决于时间延迟的测量精度。

在时延测量方面,近几年的研究主要集中于采用集成电路技术来实现,其中一类是利用 CMOS (complementary metal oxide semiconductor) 工艺定制的专用集成电路(application specific integrated circuit, ASIC) 来进行时延的测量^[8];另一类便是利用现场可编程门阵列(field programmable gate array, FPGA)^[9-10],这两类测量方法都具有高分辨率的优点,但是具有高分辨率的 ASIC 或 FPGA 等硬件计时电路并不代表它们可以实现同样高分辨率的时延测量精度。因为,由于噪声及干扰的存在,测量系统中需设置峰值检波与阈值比较电路^[11],直接测量时并不能对噪声和干扰进行有效的抑制,所以其无法获得真正精确的起止时刻点,尤其是在较强噪声或干扰的影响下,其测量结果将存在较大的测量误差。

具有强噪声抑制能力的时间延迟估计(噪声背景下时延测量称之为估计)方法有很多,如自适应法、相关法、子空间法、最大似然方法以及压缩感知方法等^[12-13]。以上方法多用于对射式超声波测风系统,其中采用相对时差法的对射式超声波测风仪的最大优势是无需对环境温湿度测量进而对超声波声速进行补偿,但在较高风速条件下其测量精度较差。文献[14-15]提出了一种基于弧形传感器阵列的超声波风速风向测量解决方案,并且基于所提出的弧形阵列结构应用阵列信号处理技术实现了风速风向的有效测量。所提方法噪声抑制能力强,具有较大的应用潜力。但是,上述方法无法精确保证在较大发射扇形角域范围内,超声波传感器发射的超声波各向能量均衡,或者为了扩大发射角域范围,需大幅减小超声波中心频率,导致其指向性变差。文献[16]提出了一种基于波束形成算法的三维超声波阵列测风系统,利用一

发多收的超声波传感器阵列结构,结合波束形成算法实现空域滤波来提高测风过程中抑制噪声的能力。该测风系统同样存在超声波发射角域大及阵列结构复杂等问题。

为简化超声波测风系统中复杂的阵列结构,同时提高测风过程中干扰噪声的抑制能力,提出了一种仅包含一个超声波发射阵元和两个超声波接收阵元的超声波测风系统,然后在此系统结构上采用硬件易实现的相关方法对超声波到达两个接收阵元的延迟时间进行估计,进而根据超声波传输时间与风矢量之间的关系获得风速风向值。所提方法采用基于相关方法的双阵元超声波接收阵列,结构紧凑可避免超声波发射角域过大的问题,并且具有整体结构简单,算法计算复杂度低、易实现等优点。文中首先通过仿真实验对所提方法的可行性与有效性进行了验证,随后搭建了双阵元超声波接收阵列测风系统并在实验室测试环境中进行了实测数据验证。

1 阵列结构与测风原理

1.1 双阵元超声波接收阵列结构

双阵元超声波接收阵列风矢量测量系统原理如图 1 所示。整个系统结构主要包含一个超声波发射阵元(传感器 O)和两个超声波接收阵元(传感器 S_1 与传感器 S_2)。其中两个接收阵元传感器 S_1 和 S_2 与发射传感器 O 之间的距离 L 相同,且对称分布于发射阵元法线 ON 的左右两侧,夹角为 α ,这样可保证发射到两个接收阵元上的超声波能量均衡,从而避免能量不均衡导致起振时间不同而引起的测量误差。

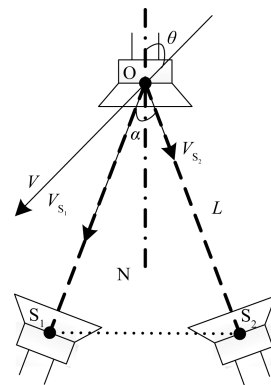


图 1 双阵元超声波接收阵列结构

Fig. 1 Dual sensors ultrasonic receiving array structure

图 1 中,假设与超声波传感器 OS_1S_2 处于同一水平面上的风速大小为 V 、风向角为 θ , V_{s_1} 和 V_{s_2} 分别为风速在超声波传感器 OS_1 和 OS_2 方向上的分量。根据超声波传感器测风原理及图 1 中超声波发射及接收阵元之间的

空间结构关系可知,当无风情况时,传感器 O 发射的超声波在 OS₁ 和 OS₂ 方向上的传输声速 V_c 相同,即传感器 S₁ 和 S₂ 接收到超声波所用时间相同且确定;当有风情况时,实际的超声波传输速率会受到风速分量 V_{S_1} 和 V_{S_2} 的影响,致使超声波到达接收阵元 S₁ 和 S₂ 的时间发生变化。因此,通过测量超声波实际的传输时间,即可获得风速风向值。

1.2 风矢量测量原理

采用高斯信号模型对超声波信号进行描述,则超声波发射信号可表示为:

$$x(t) = s(t) + n(t) \quad (1)$$

式中: $s(t) = \beta e^{-kt^2} \cos(\omega t + \varphi)$ 表示发射信号,其中 β 为幅度衰减系数, k 为高斯系数, $\omega = 2\pi f$ 为角频率,其中 f 为超声波中心频率, φ 为初始相位; $n(t)$ 表示发射信号附加噪声。

经时间延迟 τ 后,即超声波接收阵元接收到的信号可表示为:

$$y_i(t) = s(t - \tau_i) + n_i(t) \quad (2)$$

式中: τ_i 表示超声波到达第 i 个接收阵元的时间延迟; $n_i(t)$ 表示信号到达第 i 个接收阵元的附加噪声。

由图 1 双阵元超声波接收阵列结构可知,无风情况时超声波到达两阵元的延迟时间相等,均为:

$$\tau_0 = L/V_c \quad (3)$$

有风情况时,超声波到达阵元 S₁ 的延迟时间为:

$$\tau_1 = L/(V_c + V_{S_1}) \quad (4)$$

到达阵元 S₂ 的延迟时间为:

$$\tau_2 = L/(V_c + V_{S_2}) \quad (5)$$

由式(4)和(5)可得超声波传感器 OS₁ 和 OS₂ 方向上的风速分量分别为:

$$V_{S_1} = L/\tau_1 - V_c \quad (6)$$

$$V_{S_2} = L/\tau_2 - V_c \quad (7)$$

又由于:

$$V_{S_1} = V \cos(\theta - \alpha/2) \quad (8)$$

$$V_{S_2} = V \cos(\theta + \alpha/2) \quad (9)$$

则可得风速 V 和风向角 θ 分别为

$$V = \frac{\sqrt{V_{S_1}^2 + V_{S_2}^2 - 2V_{S_1}V_{S_2}\cos\alpha}}{\sin\alpha} \quad (10)$$

$$\theta = \arctan\left[\frac{V_{S_1} - V_{S_2}}{(V_{S_1} + V_{S_2})\tan(\alpha/2)}\right] \quad (11)$$

通过上述分析可知,即当风速 V 和风向角 θ 确定后,超声波到达双阵元 S₁ 和 S₂ 的延迟时间 τ_i 随之确定;反之,当通过发射和接收数据 $x(t)$ 和 $y_i(t)$ 确定延迟时间 τ_i 后,也即确定了风速 V 和风向角 θ 。

2 风矢量测量算法分析

2.1 时间延迟估计算法

计算发射信号 $x(t)$ 与接收信号 $y_i(t)$ 的相关函数,有:

$$R_{xy_i}(\tau) = E[x(t)y_i(t+\tau)] = R_{ss}(\tau - D) + R_{sn}(\tau - D) + R_{sn_i}(\tau) + R_{nn_i}(\tau) \quad (12)$$

式中: D 表示实际延迟时间; $R_{ss}(\tau - D)$ 表示信号 $s(t)$ 的相关函数; $R_{sn}(\tau - D)$, $R_{sn_i}(\tau)$, $R_{nn_i}(\tau)$ 分别表示 $s(t)$ 与 $n(t)$, $s(t)$ 与 $n_i(t)$, $n(t)$ 与 $n_i(t)$ 的相关函数。

由于 $s(t)$, $n(t)$, $n_i(t)$ 三者互不相关,故式(12)中后 3 项均为 0。因此式(12)可简化为:

$$R_{xy_i}(\tau) = R_{ss}(\tau - D) \quad (13)$$

由式(13)可知,所求的相关函数理论上不含有噪声信息,所以在进行时延估计时可以对噪声进行有效抑制,从而可提高时延估计的精度。

由相关函数的性质可得:

$$R_{xy_i}(\tau) = R_{ss}(\tau - D) \leq R_{ss}(0) \quad (14)$$

即当 $\tau = D$ 时 $R_{xy_i}(\tau)$ 取得最大值,则可通过求其最大值获得时延估计值,即:

$$\hat{D} = \operatorname{argmax}_{\tau} [R_{xy_i}(\tau)] \quad (15)$$

同时,根据 Wiener-Khinchin 定理,互相关函数与互功率谱密度互为傅里叶变换对,则:

$$R_{xy_i}(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_{xy_i}(\omega) e^{j\omega\tau} d\omega \quad (16)$$

式中: $S_{xy_i}(\omega)$ 为发射信号 $x(t)$ 与接收信号 $y_i(t)$ 的互功率谱密度函数,其表示为:

$$S_{xy_i}(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} E[X(\omega, T) Y_i^*(\omega, T)] \quad (17)$$

式中: $X(\omega, T) = \int_{-T}^T x(t) e^{-j\omega t} dt$, $Y_i(\omega, T) = \int_{-T}^T y_i(t) e^{-j\omega t} dt$, T 表示有限时长。

据此可知,拟求发射信号与接收信号的相关函数,可通过求其功率谱密度函数再求傅里叶逆变换得到。利用快速傅里叶变换可以极大的降低在时域中进行相关运算的计算复杂度,提高运算速度。

2.2 风矢量测量范围分析

本文方法可以实现风速 V 、风向角 θ 的风矢量测量。值的注意的是,风速的理论测量范围为 $V \leq V_c$,即测量的风速应小于超声波在无风情况下的传输速度,如果待测风速大于声速,则本文提出的风速测量方法将失效。因为与超声波发射方向相反的风速达到声速 V_c 及以上时,超声波接收阵元处将不会有任何空气波动,即接收阵元无法接收到任何超声波信号。此时所有波前将被挤压而

聚集在一个被称为马赫锥的圆锥面内,这种情况不在本文研究范围内。而实际中测量自然风,一般要求风速测量达到 60 m/s 即可。因此,本文提出的方法远远可以满足风速测量范围的要求。

同时,提出的双阵元接收阵列结构可以实现 $0 \sim 2\pi$ 风向角度的测量。针对图 1 中超声波传感器接收阵元 S_1 , 当实际来风方向角 θ 位于 $0 \sim (\pi + \alpha)/2$ 或 $(3\pi + \alpha)/2 \sim 2\pi$ 范围内时, 超声波在 OS_1 方向上实际的传输速率应为声速 V_c 与风速分量 V_{S_1} 之和。此时,根据式(8)可知:

$$V_{S_1} = V \cos(\theta - \alpha/2) > 0, \quad (18)$$

$$0 < \theta < (\pi + \alpha)/2 \text{ 或 } (3\pi + \alpha)/2 < \theta < 2\pi$$

将 V_{S_1} 代入式(4)中, 显然, 式(4)是成立的。

当实际来风方向角 θ 位于 $(\pi + \alpha)/2 \sim (3\pi + \alpha)/2$ 范围内时, 超声波在 OS_1 方向上实际的传输速率应为声速 V_c 与风速分量 V_{S_1} 之差。此时,根据式(8)可知:

$$V_{S_1} = V \cos(\theta - \alpha/2) < 0, \quad (19)$$

$$(\pi + \alpha)/2 < \theta < (3\pi + \alpha)/2$$

将 V_{S_1} 代入式(4)中可知, 此时式(4)同样是成立的。综上可得, 在 $0 \sim 2\pi$ 风向角度范围内, 超声波到达接收阵元 S_1 的延迟时间均可以利用式(4)统一表示。

同理针对超声波传感器接收阵元 S_2 , 在 $0 \sim 2\pi$ 风向全角度范围内, 超声波到达接收阵元 S_2 的延迟时间均可利用式(5)统一表达。

另外, 由式(11)求得风向角 θ 的范围为 $-\pi/2 \sim \pi/2$, 而实际风向角范围为 $0 \sim 2\pi$, 所以由式(11)求得风向角后还需经下述关系进行修正。

- 1) 若 $\tau_1 \leq \tau_2 < \tau_0$ 且 $0 \leq \theta < \pi/2$, 则 $\tilde{\theta} = \theta$;
- 2) 若 $\tau_0 < \tau_1 \leq \tau_2$ 且 $-\pi/2 \leq \theta \leq 0$, 则 $\tilde{\theta} = \theta + \pi$;
- 3) 若 $\tau_1 > \tau_2$ 且 $0 < \theta < \pi/2$, 则 $\tilde{\theta} = \theta + \pi$;
- 4) 若 $\tau_1 > \tau_2$ 且 $-\pi/2 < \theta < 0$, 则 $\tilde{\theta} = \theta + 2\pi$ 。

3 实验验证与分析

超声波在空气中传输时会受到温度、湿度等因素的影响, 在实际中应用时一般采用经验式(20)对其进行修正, 以提高风速风向测量的精度。以下各实验中, 超声波声速均采用为修改后的速率值。

$$V_c = 331.4\sqrt{K} \quad (20)$$

式中: K 表示为测量温度。

仿真实验中, 超声波收发阵元之间的距离 $L = 10$ cm, 接收阵元夹角 $\alpha = 10^\circ$, 超声波频率为 200 kHz, 幅度衰减系数 $\beta = 0.8$, 采样点数为 2 000, 风矢量测量的均方根误差 (root mean square error, RMSE) 表示为:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{Q} \sum_{q=1}^Q [\hat{\psi}(q) - \psi]^2} \quad (21)$$

式中: Q 表示实验次数; $\hat{\psi}(q)$ 表示为第 q 次风速或风向角的估计值; ψ 表示为风速或风向角的实际值。

实验 1 可行性验证实验。选取风速 $V = 30$ m/s、风向角 $\theta = 50^\circ$, 在信噪比 $\text{SNR} = 5$ dB 条件下, 进行 20 次蒙特卡罗实验的结果如图 2 和 3 所示。从图 2~3 中可以看出, 风速和风向角每次均可较为准确的测量得到, 且测量偏差较小, 表明所提方法是有效可行的。

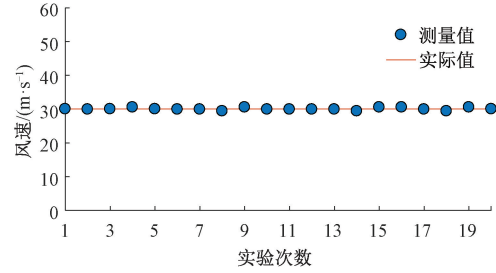


图 2 风速测量结果

Fig. 2 Measurement results of wind speed

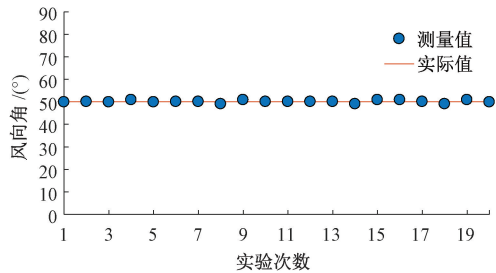


图 3 风向测量结果

Fig. 3 Measurement results of wind direction

实验 2 不同信噪比下风速和风向角的测试实验。选取风速 $V = 30$ m/s、风向角 $\theta = 50^\circ$, 验证本文方法在不同信噪比条件下的测量性能, 并与采用对射式结构的超声波传感器方法进行比较。信噪比从 1 dB 开始至 15 dB 结束, 每增加 2 dB 进行 1 000 次蒙特卡罗实验。图 4 与 5 所示为采用本文方法和对射式结构系统的风速和风向角测量的均方差误差曲线。从图 4 和 5 可以看出, 本文方法在不同信噪比下均具有比对射式超声波测风系统更小的 RMSE, 尤其是在较低信噪比条件下, 本文方法具有更强的噪声抑制能力和更高的测量精度。

实验 3 不同风速或不同风向角的测试实验。在 $\text{SNR} = 5$ dB 时, 验证所提方法在风速和风向角变化时的测量性能。风速从 $0 \sim 60$ m/s 间隔 5 m/s 均匀变化, 风向角从 $0^\circ \sim 360^\circ$ 间隔 30° 均匀变化。在每个间隔点做一次实验, 实验结果如图 6 和 7 所示。从图 6~7 中可以得知, 在风速或风向变化时, 本文方法仍能较为准确的测量出风速

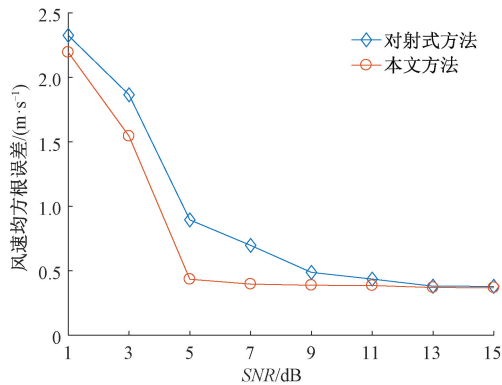


图4 不同信噪比风速测量均方根误差

Fig. 4 RMSE of wind speed measurement versus SNR

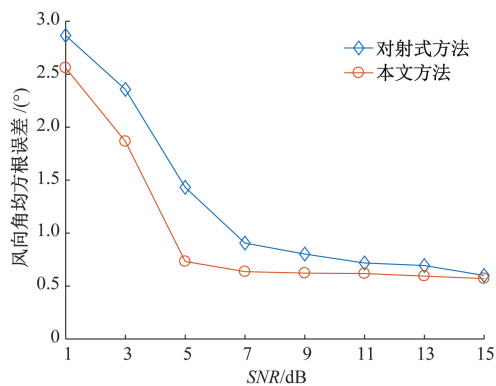


图5 不同信噪比风向角测量均方根误差

Fig. 5 RMSE of wind direction measurement versus SNR

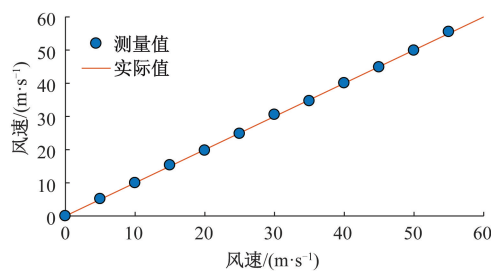


图6 不同风速时的测量结果

Fig. 6 Measurement results under different wind speeds

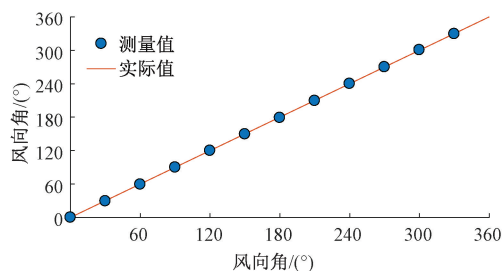


图7 不同风向时的测量结果

Fig. 7 Measurement results under different wind directions

和风向,且结果偏差较小,表明所提方法可以实现宽范围、全角域的风矢量测量。

实验4 不同温度条件下风速和风向角的测试实验。选取风速 $V=20\text{ m/s}$ 、风向角 $\theta=60^\circ$,在 $\text{SNR}=5\text{ dB}$ 时,针对4种不同环境温度 -20°C 、 0°C 、 10°C 和 20°C 条件下分别进行实验测试。超声波在不同温度下传输速度不同,故需实时测温并根据式(20)对超声波传输声速进行实时修正。按照测试标准每个温度点下连续进行100次实验,取其平均值作为最终结果如表1所示。

表1 不同温度下风速风向的测试结果

Table 1 Measurement results of wind speed and direction at different temperatures

参数	测量结果			
	-20°C	0°C	10°C	20°C
风速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	19.92	20.02	19.98	20.03
风向角/($^\circ$)	60.1	60.2	60.1	60.2

从表1中可以看出,上述4种不同温度条件下风速风向角测试结果均在测量误差允许范围内,表明所提方法具有较高的测量精度。而比较不同温度下的测试结果,发现温度的变化并没有对测试结果具有显著的影响,表明通过测量环境温度对超声波声速进行修改可以有效提高风速风向的测量精度。

实验5 实测系统验证实验。验证所设计的系统结构及提出的测量方法在实际环境中对风矢量测量的有效性,搭建双阵元超声波接收阵列的风速风向测量实验系统如图8所示,并在实验室测试环境下进行实测数据验证。

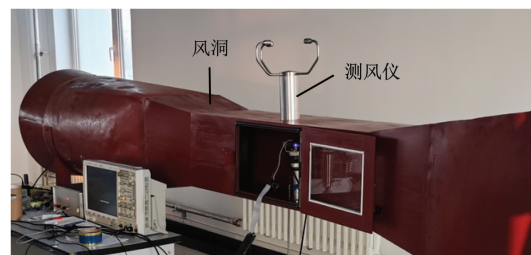


图8 实验系统

Fig. 8 Experiment system

在正式测试之前,需在无风条件下对测试系统进行标定实验,以避免由于系统误差导致超声波到达双阵元时间不一致而引起的系统误差。测试系统中测风仪是用对射式超声波测风仪改装而来,采用的超声波传感器型号为US200-12G,标称频率为 $200.0\pm 8.0\text{ kHz}$ 。超声波接收信号经驱动电路后经AD采样至STM32F407VG微处理器中与发射信号做相关运算。按照测试标准及规则,

分别选取 5、10 和 15 m/s 的测量风速以及 0°、90°和 180°的测量风向角分别进行测试,实验结果如表 2 和 3 所示。

表 2 风速的实际测试结果

Table 2 Actual measurement results of wind speed

参数	测量结果		
	5 m/s	10 m/s	15 m/s
测量值/(m·s ⁻¹)	5.11	10.20	15.34
相对误差/%	2.2	2.0	2.3

表 3 风向角的实际测试结果

Table 3 Actual measurement results of wind direction

参数	测量结果		
	0°	90°	180°
测量值/(°)	0.9	88.5	181.1
测量误差/(°)	0.9	-1.5	1.1

从表 2 中可以得知,本次实验针对 3 种不同风速测量得到的最大相对误差为 2.3%,而在测风领域,风速测量的允许误差一般为 3%之内。从表 3 中可以得知,针对 3 种不同风向角测量结果的最大测量误差为-1.5°,而风向角测量的允许误差一般在±3°之内。可见采用本文所设计的系统结构及测量方法基本可满足测量要求,搭建的风矢量实验系统测试检验基本合格。

4 结 论

本文根据测风领域对超声波测风系统测量精度高、噪声抑制强以及速度快的要求,提出了一种应用双阵元超声波接收阵列的风矢量测量方法,介绍了设计的双阵元超声波接收阵列结构及风矢量测量原理。然后据此结构研究了一种基于相关方法的超声波到达延迟时间估计算法,根据超声波传输时间与风矢量之间的关系可直接获得风速风向值。最后对本文方法的风矢量测量范围进行了分析,并进行了仿真实验验证,且搭建了实际测量系统。在实验室有限测试环境条件下,风速测量的最大相对误差为 2.3%,风向角测量的最大测量误差为-1.5°。当然,所设计的风矢量测量系统还有很大的提升空间,尤其是稳定性方面。另外,超声波声速还与环境湿度及空气密度等因素有关,考虑相关因素还可以进一步消除超声波声速不稳定的影响。

参考文献

- [1] MA B, TENG J, ZHU H, et al. Three-dimensional wind measurement based on ultrasonic sensor array and multiple signal classification [J]. *Sensors*, 2020, 20(2): 1-16.
- [2] ZHAO C, CHEN Z, LI J, et al. Wind direction estimation using small-aperture HF radar based on a circular array [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2020, 58(4): 2745-2754.
- [3] 魏昱洲, 许西宁. 基于 LSTM 长短期记忆网络的超短期风速预测 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2019, 33(2): 64-71.
- WEI Y ZH, XU X N. Ultra-short-term wind speed prediction model using LSTM networks [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2019, 33(2): 64-71.
- [4] 行鸿彦, 魏佳佳, 徐伟, 等. 超声波换能器测风阵列的改进设计 [J]. *仪器仪表学报*, 2017, 38(8): 1988-1995.
- XING H Y, WEI J J, X W, et al. Improved design of ultrasonic transducer array for wind measurement [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, 38(8): 1988-1995.
- [5] 储玉飞, 刘东, 王珍珠, 等. 多普勒测风激光雷达的基本原理与技术进展 [J]. *量子电子学报*, 2020, 37(5): 580-600.
- CHU Y F, LIU D, WANG ZH ZH, et al. Basic principle and technical progress of Doppler wind lidar [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2020, 37(5): 580-600.
- [6] 行鸿彦, 吴红军, 徐伟, 等. 三维超声波换能器测风阵列研究 [J]. *仪器仪表学报*, 2017, 38(12): 2943-2951.
- XING H Y, WU H J, X W, et al. Study on ultrasonic transducer array for three-dimensional wind [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, 38(12): 2943-2951.
- [7] 涂满红, 曹云昌, 詹国伟, 等. 超声波测风仪风速的不同算法误差分析 [J]. *气象与环境科学*, 2019, 42(1): 119-126.
- TU M H, CAO Y CH, ZHAN G W, et al. Error analysis of different algorithms for ultrasonic wind speed meter [J]. *Meteorological and Environmental Sciences*, 2019, 42(1): 119-126.
- [8] CHENG Z, DEEN M J, PENG H. A low-power gateable vernier ring oscillator time-to-digital converter for biomedical imaging applications [J]. *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, 2016, 10(2): 445-454.
- [9] 张敏. 高分辨率时间间隔测量技术研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2017.
- ZHANG M. Research on high-resolution time interval measurement technology [D]. Xi'an: Xidian University,

- 2017.
- [10] WON J Y, KWON S I, YOON H S, et al. Dual-phase tapped-delay-line time-to-digital converter with on-the-fly calibration implemented in 40 nm FPGA [J]. IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems, 2016, 10(1): 231-242.
- [11] 刘华欣. 基于超声波传感器的风速风向测量研究[J]. 仪表技术与传感器, 2018, 431(12): 105-108, 114.
- LIU H X. Research on wind speed and direction measurement based on ultrasonic sensor [J]. Instrument Technique and Sensor, 2018, 431(12): 105-108, 114.
- [12] 张延成, 李志刚. 基于 LMS 自适应时延估计和 FPGA 的超声波测风系统研究 [J]. 应用声学, 2013, 32(1): 51-56.
- ZHANG Y CH, LI ZH G. The ultrasonic wind measurement system based on LMS adaptive time delay estimation algorithm and FPGA [J]. Applied Acoustics, 2013, 32(1): 51-56.
- [13] 冷雪冬, 巴斌, 逯志宇, 等. 基于回溯筛选的稀疏重构时延估计算法 [J]. 物理学报, 2016, 65(21): 1-9.
- LENG X D, BA B, LU ZH Y, et al. Sparse reconstruction time delay estimation algorithm based on backtracking filter [J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(21): 1-9.
- [14] LI X B, SUN H X, GAO W, et al. Wind speed and direction measurement based on arc ultrasonic sensor array signal processing algorithm [J]. ISA Transactions, 2016, 65: 437-444.
- [15] LI X B, ZHU G Y, GAO W, et al. A novel ultrasonic array signal processing scheme for wind measurement [J]. ISA Transactions, 2018, 81: 259-269.
- [16] 李新波, 朱阁彦, 李厚禹, 等. 三维超声阵列风速风向测量方法 [J]. 西安交通大学学报, 2019, 53(9): 70-78.
- LI X B, ZHU G Y, LI H Y, et al. A method for

measuring wind velocity and direction with three-dimensional ultrasound array [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2019, 53(9): 70-78.

作者简介



单泽彪, 2010 年于吉林化工学院获得学士学位, 2013 于吉林大学硕博连读, 2016 年于吉林大学获得博士学位, 现为长春理工大学讲师、硕士生导师, 长春气象仪器研究所与吉林大学联合培养在站博士后。主要研究方向为声光电检测与现代信号处理、雷达与阵列信号处理。

E-mail: zbshan@cust.edu.cn

Shan Zebiao received his B. Sc. degree from Jilin Institute of Chemical Technology in 2010, and received his Ph. D. degree from Jilin University in 2016. He is currently a lecturer and master advisor at Changchun University of Science and Technology. He is a postdoctoral researcher of Changchun Meteorological Instrument Research Institute and Jilin University. His main research interests include acoustic and photoelectric detection, modern signal processing, radar and array signal processing.



刘小松 (通信作者), 2010 年于长春工业大学获得学士学位, 2012 于吉林大学硕博连读, 2016 年于吉林大学获得博士学位, 现为长春理工大学讲师、硕士生导师。主要研究方向为信息感知与先进控制技术, 复杂系统建模、仿真与控制。

E-mail: liuxs@cust.edu.cn

Liu Xiaosong (Corresponding author) received her B. Sc. degree from Changchun University of Technology in 2010, and received her Ph. D. degree from Jilin University in 2016. She is currently a lecturer and a master advisor at Changchun University of Science and Technology. Her main research interests include information perception and advanced control technology, modeling, simulation and control of complex systems.