

DOI: 10.13382/j.jemi.B2306525

基于二次相关的双阵元接收阵列超声波风矢量测量*

单泽彪^{1,2} 韩明轩¹ 谢世娟¹ 刘小松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)

摘要:针对在低信噪比条件下超声波风速风向测量精度低的问题,提出一种基于二次相关法的双阵元接收阵列超声波风速风向测量方法。首先采用由一个超声波发射传感器和两个接收传感器组成的阵列结构,其次在该系统结构基础上给出一种基于二次相关的超声波传播时间测量方法,利用二次相关算法对噪声抑制更强的性能可有效提高风速风向测量的精度。最后通过模拟仿真实验对所提测风方法进行有效性验证,并通过双阵元测风系统进行了实测数据验证。实验结果表明,基于二次相关算法的双阵元接收阵列超声波传感器风速风向测量方法具有较强的噪声抑制能力,在实测环境下风速风向最大测量误差分别为0.24 m/s和2.4°,基本达到了超声波测风仪的设计要求。

关键词: 超声波测风; 风速风向测量; 二次相关; 双阵元阵列结构

中图分类号: TN911; TH765 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4

Quadratic correlation-based ultrasonic wind vector measurement of dual-array receiver arrays

Shan Zebiao^{1,2} Han Mingxuan¹ Xie Shijuan¹ Liu Xiaosong¹

(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)

Abstract: Since the wind speed and direction measurement accuracy of ultrasonic anemometers is low and the noise suppression capacity is poor, a double-array receiving array ultrasonic sensor wind speed and direction measurement technique based on the secondary correlation method is presented. Firstly, an array structure consisting of an ultrasonic transmitting array and two receiving arrays is adopted, secondly, a method for measuring ultrasonic propagation time based on quadratic correlation is given according to the structure of the system, which can effectively improve the accuracy of wind speed and direction measurement by using stronger performance of the quadratic correlation algorithm for noise suppression. Finally, the effectiveness of the proposed method is verified by simulation experiments and a real measurement system built. The experimental results show that the wind speed and direction measurement method of the dual-array receiving array ultrasonic sensor based on the quadratic correlation algorithm has a strong noise suppression capability, and has a higher wind vector measurement accuracy. The practical test shows that the maximum error of wind speed and wind direction angle measurement are 0.24 m/s and 2.4°, which basically meets the accuracy requirements of ultrasonic wind speed and direction measurement.

Keywords: ultrasonic wind measurement; wind speed and direction measurement; quadratic correlation; dual elements array

0 引言

风速风向是气象领域中最关键的气象要素之一,在众多行业中风速风向的测量都具有重要的意义^[1-3]。

近年来,根据超声波在空气中传播会受到风速风向的影响这一原理而提出的超声波测风仪^[4-5],相比传统的机械式测风仪,超声波测风仪不受机械磨损影响,且体型小巧、结构简单、测量范围广,能实现长时间高精度测量,在风矢量测量的发展过程中起到了重要作用^[6-8]。基于超

收稿日期: 2023-05-14 Received Date: 2023-05-14

* 基金项目: 吉林省自然科学基金(YDZJ202301ZYTS412)、吉林省科技发展计划项目(20220204138YY)资助

声波测风仪的测量方法有很多如时差法,频差法,空间滤波法,多普勒法,卡门涡旋法等^[9-10]。其中基于时差法原理的测风方法由于原理清晰、方法简单且易实现已成为当前应用最为广泛的超声波测风方法^[11-12]。

超声波传播时间的测量精度和稳定性是风速风向测量精确与否的关键因素。为确定超声波发射信号以及接收回波之间的传播时间,近几年多利用硬件计时电路对其进行测量,如 CMOS 工艺定制的专用集成电路或现场可编程门阵列^[13-14]等,虽然二者均具有高分辨率时间测量的特点,但在实际环境中由于噪声等干扰因素的影响,往往难以确定超声波收发信号的起止时刻点^[15]。文献[16-17]设计的超声波测风仪为了降低环境噪声的干扰,在系统测量模块前搭建接收调理电路,包括一个四阶带通滤波器以及信号放大电路,并且分别采用小波变换的缺省阈值降噪算法和平均值算法对数据进行降噪处理。但是以上方法抑制噪声能力有限,在强噪声背景下导致风矢量测量误差较大。

因此在超声波传播时间测量方面,背景噪声和干扰的抑制方法研究成为了人们关注的重点。文献[18]设计了一种超声波三维风矢量测量系统,通过时差法原理进行风速风向的测量。这种方法的优点是将原有需要测量 4 个时间延迟即 8 个时刻点的脉冲缩减为 4 个函数的峰值即可计算出风速风向值,降低了计算量。但在低信噪比时此方法的性能依然欠佳。文献[19]设计了一种基于互相关算法的双阵元超声波传感器结构的测风仪,其优点在于结构相对比较简单,算法硬件易实现,但该方法依旧没解决在低信噪比下风矢量测量精确度下降的问题。

为解决上述问题,本文在前期研究的基础上提出一种基于二次相关的双阵元接收阵列超声波风矢量测量方法。该方法采用的测风系统包含 3 个超声波传感器,其中之一仅为超声波发射阵元,另两个仅为超声波接收阵元。进而通过二次相关法对超声波传播时间进行测量,提高了对噪声的抑制能力。同时针对二次相关算法需多次相关运算、计算量较大等问题,根据相关函数与其功率谱密度函数互为傅里叶变换对采用快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)简化运算复杂程度。最后通过可行性仿真实验和对比仿真实验验证了所提方法的有效性和优越性。

1 阵列结构与测风原理

1.1 系统阵列结构

如图 1 所示,双阵元超声波接收阵列测风系统由 3 个超声波换能器 S_1 、 S_2 和 S_3 组成,其中换能器 S_1 仅为发射阵元,对称分布于 S_1N 两侧的换能器 S_2 和 S_3 同为接

收阵元且与换能器 S_1 的距离均为 L ,所形成的夹角为 α 。假设某一时刻待测风速大小为 V 、风向角为 θ ,则 V_1 和 V_2 表示 S_1S_2 和 S_1S_3 方向上的各自风速分量。当风速 $V=0$ 时,即无风条件下,换能器 S_1 发射的超声波达到换能器 S_2 和 S_3 的时间相同且确定,传播速率仅为超声波本身的传播速率 V_c 。当风速 $V \neq 0$ 时,换能器 S_1 发射的超声波将受到风速风向的影响,即达到换能器 S_2 和 S_3 的时间将发射改变,故依据测量得到的超声波传播时间可确定风速分量 V_1 和 V_2 ,进而根据矢量合成即可得到最终的风矢量大小和方向。

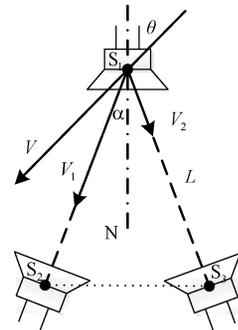


图 1 超声波测风系统结构

Fig. 1 Structure of ultrasonic wind measurement system

1.2 风矢量测量原理

由图 1 可知,无风条件下超声波发射阵元 S_1 发射的超声波到达两超声波接收阵元 S_2 和 S_3 的传播时间相等,均为:

$$\tau_0 = L/V_c \quad (1)$$

有风情况时,超声波到达阵元 S_1 的传播时间为:

$$\tau_1 = L/(V_c + V_1) \quad (2)$$

到达阵元 S_2 的传播时间为:

$$\tau_2 = L/(V_c + V_2) \quad (3)$$

由式(4)和(5)可得超声波传感器 S_1S_2 和 S_1S_3 方向上的风速分量分别为:

$$V_1 = L/\tau_1 - V_c \quad (4)$$

$$V_2 = L/\tau_2 - V_c \quad (5)$$

又由于:

$$V_1 = V\cos(\theta - \alpha/2) \quad (6)$$

$$V_2 = V\cos(\theta + \alpha/2) \quad (7)$$

则得风速 V 和风向角 θ 分别为:

$$V = \frac{\sqrt{V_1^2 + V_2^2 - 2V_1V_2\cos\alpha}}{\sin\alpha} \quad (8)$$

$$\theta = \arctan\left[\frac{V_1 - V_2}{(V_1 + V_2)\tan(\alpha/2)}\right] \quad (9)$$

通过上述分析可知,当超声波发射阵元发射超声波到两个接收阵元的传播时间确定后,也便确定了该时刻的实际风速 V 和风向角 θ 。

1.3 超声波信号模型

采用高斯模型对超声波信号加以描述^[20],则超声波发射信号可表示为:

$$x(t) = s(t) + n(t) \quad (10)$$

式中: $s(t) = \beta e^{-kt^2} \cos(2\pi ft + \varphi)$, f 表示超声波频率, φ 表示初始相位, β 和 k 分别表示为幅度衰减系数和高斯系数, $n(t)$ 表示发射噪声。

超声波接收信号表示为:

$$y_i(t) = s(t - \tau_i) + n_i(t) \quad (11)$$

式中: $s(t - \tau_i) = \beta e^{-k(t - \tau_i)^2} \cos[2\pi f(t - \tau_i) + \varphi]$, τ_i 表示超声波达到第 i 个接收阵元的传播时间, $n_i(t)$ 表示接收噪声。

2 基于二次相关的时延估计算法

二次相关的基本思想是在求得超声波发射信号的自

$$R_{xy_i}(\tau) = R_{ss}(\tau - T) =$$

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \int_{-T}^T [s(t)s(t - \tau)] dt =$$

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \int_{-T}^T \{Ae^{-kt^2} \cos(\omega t + \varphi) B e^{-k(t - \tau + T)^2} \cos[\omega(t - \tau + T) + \varphi]\} dt =$$

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \int_{-T}^T \left[\frac{AB}{2} e^{-kt^2 - k(t - \tau + T)^2} \cos(2\omega t - \omega \tau + \omega T + 2\varphi) + \frac{AB}{2} e^{-kt^2 - k(t - \tau + T)^2} \cos(\omega \tau + \omega T) \right] dt =$$

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \int_{-T}^T \left[\frac{AB}{2} e^{-kt^2 - k(t - \tau + T)^2} \cos(2\omega t - \omega \tau + \omega T + 2\varphi) \right] dt + \lim_{T \rightarrow \infty} \int_{-T}^T \left[\frac{AB}{2} e^{-kt^2 - k(t - \tau + T)^2} \cos(\omega \tau + \omega T) \right] dt \quad (14)$$

式中: 第 1 项经过长时间积分其值为 0, 则式(14)可以化简为:

$$R_{xy_i}(\tau) = K_{xy} e^{-k(\tau - T)^2/2} \cos[\omega(\tau - T)] \quad (15)$$

式中: $K_{xy} = AB \sqrt{\pi/8k}$ 。

2) 计算发射信号 $x(t)$ 的自相关函数为:

$$R_{xx}(\tau) = E[x(t)x(t - \tau)] =$$

$$R_{ss}(\tau) + R_{sn}(\tau) + R_{ns}(\tau) + R_{nn}(\tau) \quad (16)$$

假设噪声为高斯白噪声, 其功率谱密度为 $S_n(\omega) = Z_0$ 。又由于信号与噪声不相关, $R_{sn}(\tau) = R_{ns}(\tau) = 0$, 故式(16)可化简为:

$$R_{xx}(\tau) = R_{ss}(\tau) + R_{nn}(\tau) =$$

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \int_{-T}^T [s(t)s(t - \tau)] dt + Z_0 \delta(\tau) \quad (17)$$

将式(10)代入式(17), 整理可得超声波发射信号的自相关函数为:

$$R_{xx}(\tau) = K_{xx} e^{-k\tau^2/2} \cos(\omega \tau) + Z_0 \delta(\tau) \quad (18)$$

式中: $K_{xx} = A^2 \sqrt{\pi/8k}$ 。

3) 计算自相关函数 $R_{xx}(\tau)$ 与互相关函数 $R_{xy_i}(\tau)$ 的互相关函数为:

$$R_{RR}(\kappa) = E[R_{xx}(\tau - \kappa)R_{xy_i}(\tau)] =$$

$$R_{SS}(\kappa - T) + R_{SN}(\kappa) \quad (19)$$

相关函数 $R_{xx}(\tau)$ 及其与超声波接收信号的互相关函数 $R_{xy_i}(\tau)$ 之后, 再次求出二者之间的互相关函数 $R_{RR}(\tau)$, 以此进一步提高信噪比, 获得更精确的时延信息。计算过程如下:

1) 计算发射信号 $x(t)$ 与接收信号 $y_i(t)$ 的互相关函数为:

$$R_{xy_i}(\tau) = E[x(n - \tau)y_i(t)] =$$

$$R_{ss}(\tau - T) + R_{sn}(\tau - T) + R_{sn_i}(\tau) + R_{nn_i}(\tau) \quad (12)$$

式中: T 表示超声波传播时间, $R_{ss}(\tau - T)$ 表示信号 $s(t)$ 与 $s(t - T)$ 之间的相关函数, $R_{sn}(\tau - T)$, $R_{sn_i}(\tau)$, $R_{nn_i}(\tau)$ 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。理论上信号与噪声、噪声与噪声之间不相关即相关函数为 0, 因此式(12)可以化简为:

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

将式(10)和(11)代入式(13)可得:

式中: $R_{SS}(\kappa - D)$ 为 $R_{xx}(\tau)$ 与 $R_{xy_i}(\tau)$ 中信号部分的相关函数, $R_{SN}(\kappa)$ 为 $R_{xx}(\tau)$ 中噪声部分与 $R_{xy_i}(\tau)$ 中信号部分的相关函数, 则:

$$R_{RR}(\kappa) = K_{RR} e^{-k(\kappa - T)^2/4} \cos[\omega(\kappa - T)] +$$

$$K_{xy} Z_0 e^{-k\tau^2/2} \cos(\omega T) \quad (20)$$

式中: $K_{RR} = K_{xx} K_{xy_i} \sqrt{\pi/16k}$ 。

根据相关函数的性质, 式(20)在 $\kappa = T$ 时取最大值, 即:

$$R_{RR}(\kappa) \leq R_{SS}(0) + R_{SN}(T) \quad (21)$$

故通过求取式(21)的最大值便可确定传播时间为:

$$\hat{T} = \underset{\kappa}{\operatorname{argmax}} [R_{RR}(\kappa)] \quad (22)$$

由维纳-辛钦定理可知相关函数与互功率谱密度互为傅里叶变换对。因此应用 FFT 求取二次相关函数的方法可有效降低运算的计算量, 提高运算速度。经采样后的离散发射信号 $x(n)$ 与接收信号 $y_i(n)$ 的经傅里叶变换分别为:

$$X(m) = \text{FFT}[x(n)] = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j2\pi nm/N} \quad (23)$$

$$Y(m) = \text{FFT}[y_i(n)] = \sum_{n=0}^{N-1} y_i(n) e^{-j2\pi nm/N} \quad (24)$$

式中: N 为实际采样点数。

发射信号 $x(n)$ 的自功率谱密度函数及其与接收信号 $y_i(n)$ 的互功率谱密度函数分别为:

$$G_{xx}(m) = X(m)X^*(m)/N \quad (25)$$

$$G_{xy_i}(m) = X(m)Y_i^*(m)/N \quad (26)$$

则二次相关函数的功率谱密度函数为:

$$G_{RR}(m) = G_{xx}(m)G_{yy_i}^*(m)/N \quad (27)$$

可得二次相关函数的估计式为:

$$\hat{R}_{RR}(n) = \text{IFFT}^{-1} [G_{RR}(m)G_{RR}^*(m)] = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} G_{RR}(m)G_{RR}^*(m) e^{-j2\pi mn/N} \quad (28)$$

式中:IFFT⁻¹ 表示离散傅里叶逆变换。

3 实验验证与分析

实验中收发阵元距离 $L = 10 \text{ cm}$, 夹角 $\alpha = 20^\circ$, 超声波信号频率为 200 kHz 。

实验 1 可行性验证实验。信噪比为 0 dB 时, 进行 20 次蒙特卡洛实验, 选取风速 $V = 30 \text{ m/s}$ 、风向角 $\theta = 60^\circ$, 测量结果如图 2 所示。从图中可得知, 测得风速风向值整体偏差较小, 与实际风速风向值基本吻合, 表明所提方法具有较高的测风精度和较好的稳定性。

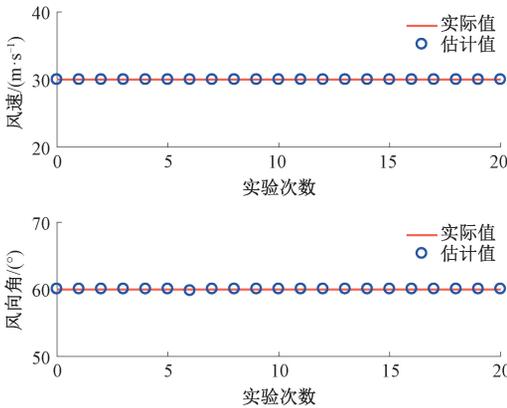


图 2 测风结果

Fig. 2 Wind measurement results

实验 2 不同测风方法的性能对比实验。将所提方法与基于一次相关的双阵元接收阵列超声波风矢量测量方法、正交对射式相关算法进行比较, 验证所提方法的有效性。实验在风速 $V = 30 \text{ m/s}$, 风向角 $\theta = 60^\circ$ 的条件下进行, 信噪比测量范围为 $-3 \sim 3 \text{ dB}$, 每点进行 1 000 次蒙特卡洛实验, 实验结果如图 3 和 4 所示。

由图 3 与 4 可知, 所提方法相较于另外两种方法在不同信噪比下均方根误差均为最小, 表明所提方法对噪声的抑制能力更强。尤其是在较低信噪比时与一次相关测风方法相比, 风速风向估计精度更高, 提升效果显著,

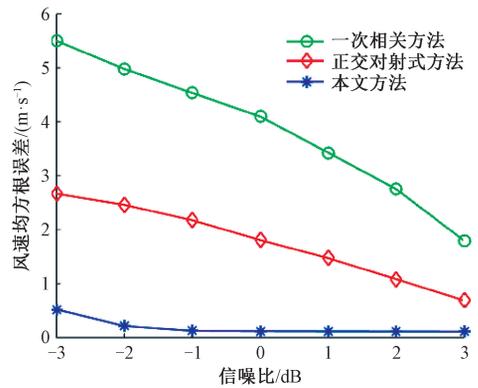


图 3 不同算法的风速测量均方根误差

Fig. 3 RMSE of wind speed measurement using different algorithms

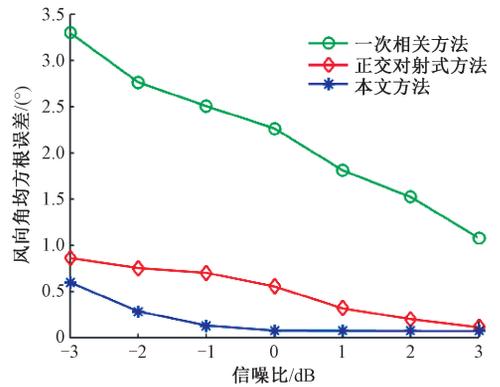


图 4 不同算法的风向测量均方根误差

Fig. 4 RMSE of wind direction measurement using different algorithms

充分验证了本文所提方法的优越性。

实验 3 不同风速风向条件下的算法性能验证实验。在信噪比为 5 dB 时, 风速从 $0 \sim 60 \text{ m/s}$ 每隔 5 m/s 取一个采样点, 风向角从 $0^\circ \sim 360^\circ$ 每隔 30° 取一个采样点, 每点进行 1 000 次蒙特卡洛实验计算均方根误差, 实验结果如图 5 和 6 所示。根据图 5 的实验结果可知所提方法在不同风速风向角条件下风速的测量准确度均较高, 最大均方根误差不超过 0.5 m/s 。由图 6 的实验结果可知, 所提方法在不同风速风向角条件下风向角的测量准确度同样较高, 最大均方根误差不超过 1° 。综上可知所提方法针对宽范围、全角域的风速风向测量均具有较高的测量精度, 且稳定性较好。

实验 4 实际环境下风速风向测量验证实验。通过双阵元接收阵列超声波风矢量测量实验平台验证所提方法在实际测量中的有效性。实验测试系统如图 7 所示。

由于驱动器、超声波传感器等硬件的响应时间会有所不同, 为避免超声波信号到达各阵元的时间出现偏差

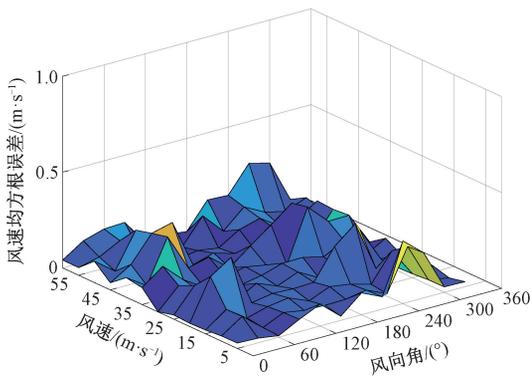


图 5 不同风速风向的风速均方根误差

Fig. 5 RMSE of wind speed in different wind speed and direction

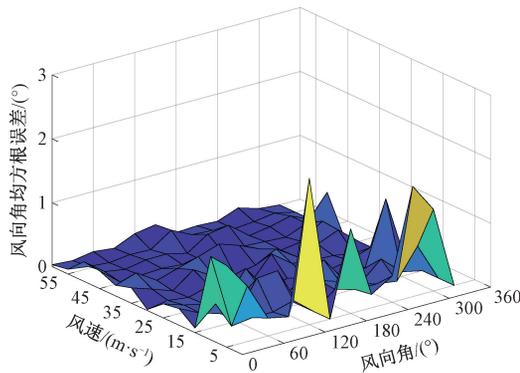


图 6 不同风速风向的风向角均方根误差

Fig. 6 RMSE of wind direction in different wind speed and direction

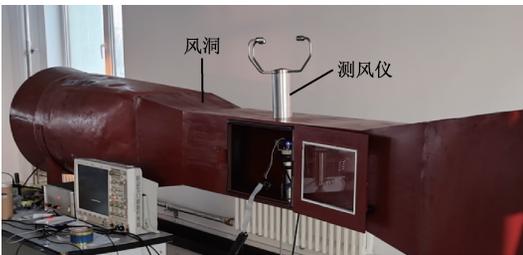


图 7 实验测试系统

Fig. 7 Experimental testing system

进而影响测量数据的精确性,首先在无风环境下对系统进行了标定实验。超声波测风系统中换能器型号为 US200-12 G,超声波中心频率为 200 kHz。采用 STM32 为中央处理器搭建信号处理模块进行信号采集及处理并通过所提算法进行风速风向值的计算分析。根据实验条件和测试标准,分别设定风速为 5、10 m/s 和风向角为 45°、90°进行实验。为验证所提方法的优越性,在相同条件下进行了基于一次相关的风速风向测量实验,并为提高测

试数据的稳定性,分别进行了 100 次独立测量实验,测试实验有效平均结果如表 1 所示。

表 1 实际测量结果

Table 1 Actual measurement results

参数	本文方法		一次相关方法	
风速实际值/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	5	10	5	10
测量值/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	5.17	10.24	5.22	10.29
测量误差/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	0.17	0.24	0.22	0.29
风向实际值/(°)	45	90	45	90
测量值/(°)	47.4	87.0	47.8	86.5
测量误差/(°)	2.4	-2.0	2.8	-2.5

由表 1 可知,应用本文所提方法进行风速测量的最大测量误差为 0.24 m/s、风向测量的最大误差为 2.4°,均达到了测风领域中对风速风向测量的基本误差要求。并且与一次相关测风方法对比,风速和风向测量误差均较小,表明所提方法具有更强的噪声抑制能力以及更高的风速风向精度。

4 结 论

为提高超声波测风系统在较强噪声背景下风速风向测量的精度,提出了一种基于二次相关的双阵元接收阵列超声波风速风向测量方法。首先,介绍了所采用的阵列结构以及基于该结构的测风原理。其次,给出了基于二次相关的超声波传播时间测量算法,并且考虑到信号的相关函数与其功率谱密度函数之间的关系,采用基于快速傅里叶变换求取二次相关函数的方法,对超声波传播时间进行估计,有效降低了算法的复杂度。最后根据模拟仿真对比实验验证了所提方法的有效性和优越性,并在实验室中进行了相关实际测量实验,实际测得风速的测量误差为 0.24 m/s、风向角的测量误差为 2.4°,基本达到了超声波测风的技术要求。

参考文献

- [1] SHAN Z B, XIE X R, LIU X S. Wind speed and direction measurement based on three mutually transmitting ultrasonic sensors[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2023, 20: 1-5.
- [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] FIEDLER M, BERG W, AMMON C. Air velocity measurements using ultrasonic anemometers in the animal zone of a naturally ventilated dairy barn[J]. Biosystems Engineering, 2013, 116: 276-285.
- [4] 鲁胜麟,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.
- LU SH L, SHAN Z B, LIU X S, et al. Wind speed and direction measurement using ultrasonic array sensors based on ESB beamforming algorithm [J]. Instrument Technique and Sensor, 2021(10): 115-119.
- [5] 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.
- [6] 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, XU W, et al. Improved design of ultrasonic transducer array for wind measurement [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(8): 1988-1995.
- [7] 单泽彪, 鲁胜麟, 刘小松, 等. 基于高阶累积量的阵列式超声波传感器风速风向测量[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(6): 279-286.
- SHAN Z B, LU SH L, LIU X S, et al. Wind speed and direction measurement of array ultrasonic sensors based on high-order cumulant[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(6): 279-286.
- [8] LOPES G M G, DA SILVA D P, DE FRANÇA J A, et al. Development of 3-D ultrasonic anemometer with nonorthogonal geometry for the determination of high-intensity winds [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2017, 66(11): 2836-2844.
- [9] LIU S Y, LI Z P, WU T, et al. Determining ultrasound arrival time by HHT and kurtosis in wind speed measurement[J]. Electronics, 2021, 10(1): 1-11.
- [10] 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.
- [11] 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, XU W, et al. Study on ultrasonic transducer array for three-dimensional wind[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(12): 2943-2951.
- [12] 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.
- [13] WON J Y, SUN I K, 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.
- [14] JIANG J J, DANG W J, DUAN F J, et al. An accurate ultrasonic wind speed and direction measuring method by combining time-difference and phase-difference measurement using coded pulses combination [J]. Applied Acoustics, 2020, 159: 107093.
- [15] 单泽彪, 韩明轩, 于渤力, 等. 基于相位翻转的超声波风速风向测量 [J]. 振动与冲击, 2023, 42(9): 230-235.
- SHAN Z B, HAN M X, YU B L, et al. Wind speed and direction measurement based on ultrasonic phase reversal[J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(9): 230-235.
- [16] 邢玉品, 陈晓. 基于 TDC-GP22 的超声波测风仪设计[J]. 现代电子技术, 2018, 41(21): 128-131, 136.
- XZING Y P, CHEN X. Design of ultrasonic anemoscope based on TDC-GP22[J]. Modern Electronics Technique, 2018, 41(21): 128-131, 136.
- [17] 文桂伏, 郭子靖, 沈洪奇. 基于时差法的三维超声波测风传感器设计[J]. 机械工程师, 2021(12): 27-29.
- WEN G F, GUO Z J, SHEN H Q. Design of 3D ultrasonic wind measurement system based on TDC-GP22 [J]. Mechanical Engineers, 2021(12): 27-29.
- [18] 邓云逸, 姚振东, 刘凯, 等. 超声波时差法的三维矢量风测量系统[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2016, 16(4): 25-28.
- DENG Y Y, YAO ZH D, LIU K, et al. Three-dimensional vector wind measurement system based on ultrasonic time-difference method [J]. Microcontrollers and Embedded Systems, 2016, 16(4): 25-28.
- [19] 单泽彪, 刘小松, 鲁胜麟, 等. 基于双阵元超声波接收阵列的风矢量测量[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(2): 228-234.
- SHAN Z B, LIU X S, LU SH L, et al. Wind vector measurement based on double array ultrasonic reception array [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(2): 228-234.
- [20] 单泽彪, 于渤力, 徐再祥, 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.

SHAN Z B, YU B L, XU Z X, et al. Ultrasonic wind speed and direction measurement method based on quadratic correlation [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(4): 322-329.

作者简介



单泽彪, 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在站博士后, 主要研究方向为弱信号检测、阵列信号处理以及压缩感知技术。

E-mail: zbshan@126.com

Shan Zebiao received his Ph. D. degree from Jilin University in 2016. Now he is a lecturer and master supervisor at Changchun University of Science and Technology, and a postdoctoral fellow at Changchun Institute of Meteorological Instruments. His main research interests include weak signal detection, array signal processing and compressed sensing technology.



韩明轩, 2021年于长春理工大学获得学士学位, 现为长春理工大学硕士研究生, 主要研究方向为信号检测与处理、现代信号处理。

E-mail: hanmx217@163.com

Han Mingxuan received his B. Sc.

degree from Changchun University of Science and Technology in 2021. Now he is a M. Sc. candidate at Changchun University of Science and Technology. His main research interests include signal detection and processing and modern signal processing.



谢世娟, 2022年于齐鲁工业大学获得学士学位, 现为长春理工大学硕士研究生, 主要研究方向为信号检测与处理、阵列信号处理。

E-mail: xieshijuan2000@163.com

Xie Shijuan received her B. Sc. degree from Qilu University of Technology in 2022. Now she is a M. Sc. candidate at Changchun University of Science and Technology. Her main research interests include signal detection and processing, array signal processing.



刘小松 (通信作者), 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 Ph. D. degree in 2016 from Jilin University. Now she is a lecturer and master supervisor 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.