

DOI: 10.7652/xjtuxb201909010

三维超声阵列风速风向测量方法

李新波, 朱阁彦, 李厚禹, 贾云龙

(吉林大学通信工程学院, 130022, 长春)

摘要: 针对传统时差法测风精度受超声波传播时间测量精度直接影响的问题,提出了一种基于空间超声波传感器阵列及波束形成算法的三维风参数测量方法。使用一种新的一发多收的空间超声波传感器阵列结构,利用波束形成算法空域滤波,实现了增强期望信号、抑制干扰、提高测风精度的效果,仿真实验结果表明:在信噪比为 5 dB 时,所提方法几乎能达到 100% 的测量成功率,且信噪比越大,测量成功率越高,均方根误差越小。搭建了硬件实验平台对所提测风方法进行实验验证,结果表明:在允许结构误差和设备误差的前提下,所测风洞中的风速为 6.363 7 m/s,与机械式测风仪所测结果 6.443 m/s 仅相差 0.079 3 m/s,初步验证了所提方法的工程可行性。所提方法可为测风方法的探索提供一种新思路。

关键词: 三维风参数测量;超声波传感器阵列;波束形成算法;测量精度

中图分类号: TH765 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2019)09-0070-09

A Method for Measuring Wind Velocity and Direction with Three-Dimensional Ultrasound Array

LI Xinbo, ZHU Geyan, LI Houyu, JIA Yunlong

(College of Communication Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: The accuracy of wind measurement by the traditional time difference method is directly affected by the measurement accuracy of the ultrasonic propagation time. A three-dimensional wind parameter measurement method based on spatial ultrasonic sensor array and beamforming algorithm is proposed, in which a new structure of spatial ultrasonic sensor array with one transmitter and multiple receivers is adopted and the beamforming algorithm is used for spatial filtering to enhance the desired signal, suppress interference and improve the accuracy of wind measurement. Simulation shows that the success rate of wind measurement can reach almost 100% when the signal-to-noise ratio is 5 dB, and the higher the signal-to-noise ratio, the higher the success rate of wind measurement and the smaller the root mean square error. A hardware experimental platform is constructed to verify the proposed wind measurement method. It is shown that in wind tunnel the wind speed measured is 6.363 7 m/s, which is only 0.079 3 m/s different from the result of 6.443 m/s measured by mechanical anemometer under the premise of allowable structural error and equipment error, so the feasibility of the method is preliminarily verified. This method provides a new idea for the following-up exploration of wind measurement methods.

收稿日期: 2019-04-10。 作者简介: 李新波(1980—),男,副教授。 基金项目: 吉林大学研究生创新研究计划资助项目(101832018C021)。

网络出版时间: 2019-06-10

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20190606.1715.014.html>

Keywords: three-dimensional wind parameter measurement; ultrasonic sensor array; beamforming algorithm; measurement accuracy

风是一种由许多在时空上随机变化的小尺度脉动叠加而成的自然现象,也是在大尺度规则气流上的一种三维矢量,主要包括风速、风向角和俯仰角这3个参数。作为一种很常见的自然现象,风的准确测量在工业、气象和航运等领域中,正发挥着越来越重要的作用^[1-3]。近年来,基于超声检测的风参数测量技术越来越成熟,且与基于机械式、热敏式和激光多普勒式等的测风技术相比,具有无磨损、测量范围大和维护成本低等优势,因此被广泛关注^[4-8]。在测风技术中,最常用的测风方法是时差法^[9-11],即通过测量在顺风和逆风情况下,超声波信号在传感器发射端和接收端之间传播的不同时间来进行风参数的测量,因此基于时差法的测风仪器的测量精度完全取决于超声波传播时间的测量精度,但由于环境噪声的影响,想要通过仪器精准测量超声波传播时间并不容易。相对于平面风参数测量,国内外对空间三维风参数测量的研究较少。邓云逸等利用正四面体的超声波传感器阵列结构,并依据时差法的测量原理,分别测出水平面和垂直面的风速风向,然后通过矢量合成得到了空间三维风参数^[12];Frank等通过联合安装在水平面和垂直面上的测风仪的测量结果,利用空间三维矢量合成计算出了三维风参数^[13];Lopes等讨论分析了超声测风仪结构对测风精度的影响,并提出了一种几何结构非正交的超声测风仪,显著提高了基于时差法进行风参数测量的准确性^[14]。但是,这些研究还是在基于时差法进行平面风参数测量的基础上,通过空间矢量的分解与合成计算出三维风参数,并没有克服基于时差法进行风参数测量的弊端。Li等在2015年提出利用阵列信号处理算法中的多重信号分类(multiple signal classification, MUSIC)的思想来计算风参数,该方法通过提取特征子空间和扫描功率谱来估计平面风参数,结果表明,所提方法相对于传统的时差法在抑制噪声和提高测量精度方面都有很大的优越性^[15],但MUSIC算法需要对阵列接收信号进行奇异值分解^[16],较大的计算量在一定程度上限制了实际应用中系统实时性的要求。

本文将阵列信号处理中典型的波束形成算法应用到三维风参数测量领域,在计算量相对较小的情况下,实现了三维风参数的测量。首先,设计了一种空间超声波传感器阵列结构,并基于该结构分析了

利用波束形成算法进行三维风参数测量的原理。然后,在Matlab软件中进行了所提测风方法的可行性实验及测量性能实验。最后,搭建了三维超声测风实验平台,对三维空间风进行了实物测量实验。

1 超声阵列结构设计及测风原理

1.1 超声阵列结构设计

三维超声测风装置结构如图1所示,主要包括超声波发射单元、超声波接收单元以及支撑单元。超声波发射单元包括1个超声波发射传感器,也称发射阵元,能在激励信号的作用下产生振动,发射出特定频率的超声波信号。超声波接收单元由8个超声波接收传感器($a_1 \sim a_4, b_1 \sim b_4$)组成,每4个组成一组,分别安装在相互垂直的弧形支撑架上,用来接收发射阵元所发射的超声波信号,超声波接收传感器也称接收阵元,发射阵元和接收阵元是型号相同、且都具有收发一体化功能的超声波传感器。支撑单元是支撑架,用来连接、支撑和固定各个超声波传感器之间的相对位置。

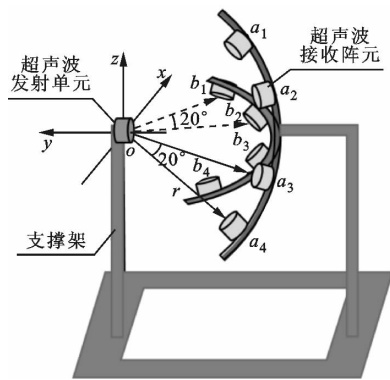


图1 三维超声测风装置结构图

由图1可知:处于垂直面 yoz 上的4个接收阵元 a_1, a_2, a_3, a_4 组成子阵列 A_a ,处于水平面 xoy 上的4个接收阵元 b_1, b_2, b_3, b_4 组成子阵列 A_b ,子阵列 A_a 和子阵列 A_b 共同组成该测风装置的传感器阵列 A ;在同一子阵列中,任意两个相邻的接收阵元与发射阵元之间连线的夹角为 20° ;发射阵元到各接收阵元之间的距离相等,即8个接收阵元在同一个以发射阵元 o 为圆心、 r 为半径的球面上。根据该测风装置的各阵元之间的相对结构可知:当无风时,从发射阵元发射的超声波信号同时传播到8个接收阵元;当有风时,超声波信号受风的影响,传播

速度发生变化,从而到达各接收阵元的时间不一致。

1.2 基于波束形成算法的测风原理

超声波在空气中传播时,风速会在其声速上叠加,使超声波传播速度变快或变慢。因此,利用超声波传播速度和超声波声速之间的关系,便能测量出风参数^[17]。

由于超声波声速 c 会受到传播介质的温度、湿度等因素的影响,因此有必要对其进行修正来提高测风装置的测量精度^[18]。目前,关于超声波声速与温度之间关系的研究较为成熟,工程上常用的表述温度 T 与超声波声速 c 之间的经验公式^[10]为

$$c = 331.4 \sqrt{1 + T/273} \quad (1)$$

本文用式(1)来修正超声波声速,下文中所使用的 c 即为修正之后的超声波声速。

空间风的来向可用图2表示,图中: V 为风速; θ 为风向角; φ 为俯仰角, $0^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ$; α 为在同一子阵列中的任意两个相邻的接收阵元与发射阵元之间连线的夹角, $\alpha = 20^\circ$; V_a 为空间来风在垂直面 $yo z$ 上的风速分量; V_b 为空间来风在水平面 xoy 上的风速分量。根据空间几何分解的相关知识可知, V_b 在水平面 xoy 上的分量如图3所示, $V_{b_1} \sim V_{b_4}$ 分别表示4个接收阵元方向的风速分量。

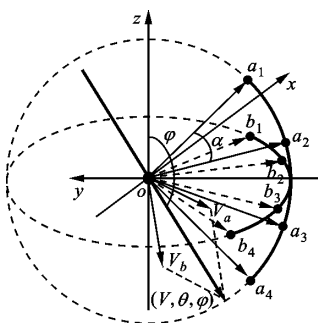


图2 空间风来向图

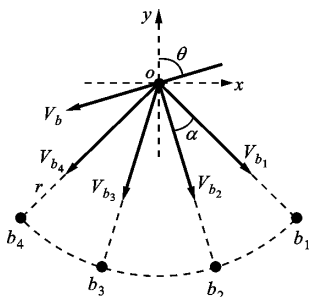


图3 V_b 在水平面 xoy 上的分量示意图

空间风在 xoy 平面上各接收阵元方向上的风速分量可表示为

$$\left. \begin{aligned} V_{b_1} &= V_b \cos\left(\theta + \frac{3}{2}\alpha\right) \\ V_{b_2} &= V_b \cos\left(\theta + \frac{1}{2}\alpha\right) \\ V_{b_3} &= V_b \cos\left(\theta - \frac{1}{2}\alpha\right) \\ V_{b_4} &= V_b \cos\left(\theta - \frac{3}{2}\alpha\right) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

由于发射阵元所发射的超声波信号 $s(t)$ 为单频窄带信号,因此可表示为

$$s(t) = u(t)e^{j[\omega t + \varphi(t)]} \quad (3)$$

式中: t 为时间; $u(t)$ 为信号的幅度; $\varphi(t)$ 为信号的相位;角频率 $\omega = 2\pi f$, $f = 40$ kHz 为信号的频率。

经过时间延迟 τ 之后,超声波信号可表示为

$$s(t - \tau) = s(t)e^{-j\omega\tau} \quad (4)$$

子阵列 A_b 所接收的阵列信号 $\mathbf{x}_b(t)$ 可表示为

$$\mathbf{x}_b(t) = \begin{bmatrix} x_{b_1}(t) \\ x_{b_2}(t) \\ x_{b_3}(t) \\ x_{b_4}(t) \end{bmatrix} = s(t) \begin{bmatrix} e^{-j\omega\tau_1} \\ e^{-j\omega\tau_2} \\ e^{-j\omega\tau_3} \\ e^{-j\omega\tau_4} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_{b_1}(t) \\ n_{b_2}(t) \\ n_{b_3}(t) \\ n_{b_4}(t) \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: x_{b_i} 为子阵列 A_b 中阵元 b_i 所接收的超声波信号; $n_{b_i}(t)$ 为子阵列 A_b 中阵元 b_i 上的空域采样噪声,且各阵元接收的噪声彼此独立; τ_i 为超声波信号传播到阵元 b_i 相对于传播到参考阵元的时间延迟,简称时延。

将式(5)以矢量形式表示,可以得到

$$\mathbf{x}_b(t) = s(t)\mathbf{D}_b + \mathbf{n}_b(t) \quad (6)$$

$$\mathbf{D}_b = \begin{bmatrix} D_{b_1} & D_{b_2} & D_{b_3} & D_{b_4} \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} e^{-j\omega\tau_1} & e^{-j\omega\tau_2} & e^{-j\omega\tau_3} & e^{-j\omega\tau_4} \end{bmatrix}^T \quad (7)$$

$$\mathbf{n}_b = \begin{bmatrix} n_{b_1} & n_{b_2} & n_{b_3} & n_{b_4} \end{bmatrix}^T \quad (8)$$

式中: $\mathbf{D}_b$ 为子阵列 A_b 的阵列流型矢量; $\mathbf{n}_b(t)$ 为子阵列 A_b 所接收的采样噪声的矢量形式。

超声波信号从发射阵元传播到子阵列 A_b 中的接收阵元 b_i ($i=1,2,3,4$) 所需的时间 t_i 可表示为

$$t_i = \frac{r}{c + V_{b_i}} \quad (9)$$

若将子阵列 A_b 中的接收阵元 b_4 作为参考阵元,则时延可表示为

$$\begin{aligned} \tau_1 &= t_1 - t_4 = r \left\{ \left[c + V_b \cos\left(\theta + \frac{3}{2}\alpha\right) \right]^{-1} - \right. \\ &\quad \left. \left[c + V_b \cos\left(\theta - \frac{3}{2}\alpha\right) \right]^{-1} \right\} \\ \tau_2 &= t_2 - t_4 = r \left\{ \left[c + V_b \cos\left(\theta + \frac{1}{2}\alpha\right) \right]^{-1} - \right. \end{aligned} \quad (10)$$

$$\left[c + V_b \cos\left(\theta - \frac{3}{2}\alpha\right) \right]^{-1} \} \quad (11)$$

$$\tau_3 = t_3 - t_4 = r \left\{ \left[c + V_b \cos\left(\theta - \frac{1}{2}\alpha\right) \right]^{-1} - \right.$$

$$\left. \left[c + V_b \cos\left(\theta - \frac{3}{2}\alpha\right) \right]^{-1} \right\} \quad (12)$$

$$\tau_4 = t_4 - t_4 = 0 \quad (13)$$

由以上分析可知,子阵列 A_b 的阵列流型矢量 $\mathbf{D}_b$ 仅与时延 τ_i 有关,而 τ_i 是由空间风在平面 xoy 上的风矢量分量信息风速 V_b 和风向 θ 确定的,所以在超声波传感器阵列结构确定的前提下,子阵列 A_b 的阵列流型矢量 $\mathbf{D}_b$ 直接由风速 V_b 和风向 θ 确定,即 $\mathbf{D}_b = \mathbf{D}_b(V_b, \theta)$ 。反过来说,确定了子阵列 A_b 的阵列流型矢量 $\mathbf{D}_b$,也就确定了空间风在平面 xoy 上的风矢量分量信息风速 V_b 和风向 θ 。

根据波束形成算法中加权系数的常规确定方法可知,在空间阵列方向辨识应用中,若空间中只有一个来自方向为 θ_k 的信号 $s(t)$,其方向矢量为 $\mathbf{a}(\theta_k)$,则当加权矢量 $\mathbf{W}$ 取作 $\mathbf{a}(\theta_k)$ 时,阵列输出为 $\mathbf{X}(t) = \mathbf{W}^H \mathbf{s}(t) = \mathbf{a}^H(\theta_k) s(t)$,对其进行功率求解后得到的功率最大^[19-20]。类比这种思想,可认为 $\mathbf{D}_b$ 是风速风向矢量,当取加权矢量 $\mathbf{W} = \mathbf{D}_b$ 时,阵列输出为 $\mathbf{y}(t) = \mathbf{W}^H \mathbf{x}_b(t)$,此时进行功率求解后功率最大。

根据常规波束形成算法,结合待估计参数为 xoy 平面上具有 2 参数的风速风向可知,子阵列 A_b 中各接收阵元所接收信号的加权输出为

$$\mathbf{y}(t) = \sum_{i=1}^4 \mathbf{D}_{b_i} \mathbf{x}_{b_i}(t) \quad (14)$$

将式(14)以矢量表示,可以得到

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{D}_b^H \mathbf{x}_b(t) = \mathbf{W}^H \mathbf{x}_b(t) \quad (15)$$

此时,子阵列 A_b 的阵列输出功率为

$$\mathbf{P}(\theta, V_b) = \mathbf{E}[\mathbf{y}^2(t)] = \mathbf{W}^H \mathbf{R} \mathbf{W} = \mathbf{D}_{b_i}^H(V_b, \theta) \mathbf{R} \mathbf{D}_{b_i}(V_b, \theta) \quad (16)$$

式中矩阵 $\mathbf{R}$ 为子阵列 A_b 的阵列接收信号 $\mathbf{x}_b(t)$ 的协方差矩阵,即

$$\mathbf{R} = \mathbf{E}[\mathbf{x}_b(t) \mathbf{x}_b^H(t)] \quad (17)$$

根据式(16),在 V_b, θ 分别处于 $0 \sim 60$ m/s 和 $0 \sim 359^\circ$ 的范围内,以确定步长遍历风速和风向,即可得到子阵列 A_b 的阵列接收信号的输出功率,其中最大功率所对应的风速和风向即为空间风在水平面 xoy 上的风矢量分量 V_b 和 θ 。

同理,对子阵列 A_a 接收的阵列信号做同样的处理,便能确定出空间风在垂直面 $yozy$ 上的风矢量分量信息风速 V_a 和风向 φ_{yoz} ,本节不再赘述。

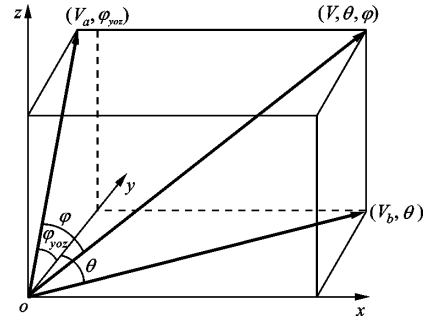


图4 空间三维风矢量的分解与合成示意图

图4是空间三维风矢量的分解与合成示意图,可以看出,在风参数矢量信息 (V_b, θ) 和 (V_a, φ_{yoz}) 已知的情况下,球坐标系下的空间矢量 (V, θ, φ) 的终点在直角坐标系下 x, y, z 轴上的投影坐标可分别表示为

$$V_x = V_b \sin\theta \quad (18)$$

$$V_y = V_b \cos\theta = V_a \cos\varphi_{yoz} \quad (19)$$

$$V_z = V_a \sin\varphi_{yoz} \quad (20)$$

所以,球坐标系下的空间矢量 (V, θ, φ) 也可以在空间直角坐标系中表示为 $(V_b \sin\theta, V_a \cos\varphi_{yoz}, V_a \sin\varphi_{yoz})$,该矢量的模为

$$\sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2} = \sqrt{(V_b \sin\theta)^2 + (V_a \cos\varphi_{yoz})^2 + (V_a \sin\varphi_{yoz})^2} \quad (21)$$

空间风矢量的来向与 z 轴正方向之间所成夹角 φ 的余弦值可表示为

$$\cos\varphi = \frac{V_a \sin\varphi_{yoz}}{\sqrt{(V_b \sin\theta)^2 + (V_a \cos\varphi_{yoz})^2 + (V_a \sin\varphi_{yoz})^2}} \quad (22)$$

夹角 φ 可表示为

$$\varphi = \arccos\left(\frac{V_a \sin\varphi_{yoz}}{\sqrt{(V_b \sin\theta)^2 + (V_a)^2}}\right), 0^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ \quad (23)$$

通过上述分析可知,在已知空间三维风矢量在水平面 xoy 和垂直面 $yozy$ 上的风矢量分量信息 (V_b, θ) 和 (V_a, φ_{yoz}) 时,便能确定出空间中的三维风参数,即风速、风向角和俯仰角。

2 仿真实验结果及分析

2.1 可行性实验

为了验证本文测风方法的可行性,在 Matlab 软件上进行了可行性仿真验证。首先,随机给出确定的空间风矢量在水平面 xoy 和垂直面 $yozy$ 上的风矢量分量信息 (V_b, θ) 和 (V_a, φ_{yoz}) ,并计算出三维风参数 (V, θ, φ) 作为真实空间中三维风参数。然后,将

子阵列 A_b 和 A_a 的阵列接收信号分别进行波束形成算法处理,得到 2 个相互垂直平面上的风矢量分量信息,并利用这 2 个风矢量分量信息计算出空间三维风参数,以此作为仿真结果。最后,将仿真结果与真实结果(V, θ, φ)进行比较,以此验证本文测风方法的可行性。

表 1 三维风参数的真实值和仿真值

条件				真实值			仿真值		
$V_b/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$\theta/(^{\circ})$	$V_a/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$\varphi_{\text{yz}}/(^{\circ})$	$V/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$\theta/(^{\circ})$	$\varphi/(^{\circ})$	$V/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$\theta/(^{\circ})$	$\varphi/(^{\circ})$
5	45	1	2	10.606 6	45	71.188 3	10.606 6	45	71.188 3
23	135	36	88	39.503 2	135	24.388 8	39.503 2	135	24.388 8
56	275	7	136	56.224 4	275	87.913 9	56.224 4	275	87.913 9

由仿真结果可知,当信噪比 $r_{\text{sn}}=5\text{ dB}$ 时,空间风的风速、风向角和俯仰角都能无差地估计出来。因此,可认为本文提出的方法是可行的。

2.2 成功率实验

由于存在环境噪声,估计结果相对于真实结果会有一定的偏差,为了验证本文方法的估计性能,设计了在不同信噪比下三维风矢量估计结果成功率的实验。由于速度扫描步长为 0.1 m/s 、角度扫描步长为 1° ,所以在该实验中,当速度估计的误差小于 0.1 m/s 、角度估计误差小于 1° 时,都认为估计成功。

实验条件如下:信噪比 r_{sn} 的取值范围为 $-6\sim 20\text{ dB}$,步长为 1 dB 。在每个信噪比下做 400 次蒙特卡罗实验,分别估计可行性实验中的 3 组随机参数,结果如图 5~7 所示。

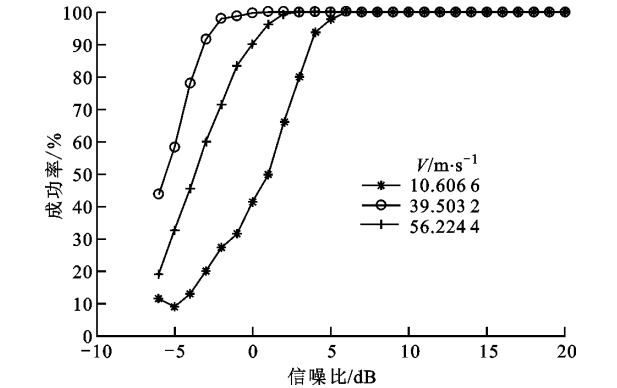


图 5 风速估计成功率

由仿真结果可知,在可接受误差存在的前提下,三维风参数的估计成功率随着信噪比的增加而增加,且在信噪比 $r_{\text{sn}}\geq 5\text{ dB}$ 时,成功率几乎达到 100% 。

2.3 均方根误差实验

为了讨论估计结果与真实结果的偏差度,设计了在不同信噪比的条件下,三维风矢量信息估计结

实验条件如下:模拟发射的超声波信号频率为 40 kHz ;发射阵元到各接收阵元之间的距离为 $r=10\text{ cm}$;各接收阵元上的噪声为加性高斯白噪声;速度的扫描范围为 $0\sim 60\text{ m/s}$,步长为 0.1 m/s ;角度的扫描范围为 $0\sim 359^{\circ}$,步长为 1° 。当快拍数为 5 000、信噪比 $r_{\text{sn}}=5\text{ dB}$ 时,仿真结果如表 1 所示。

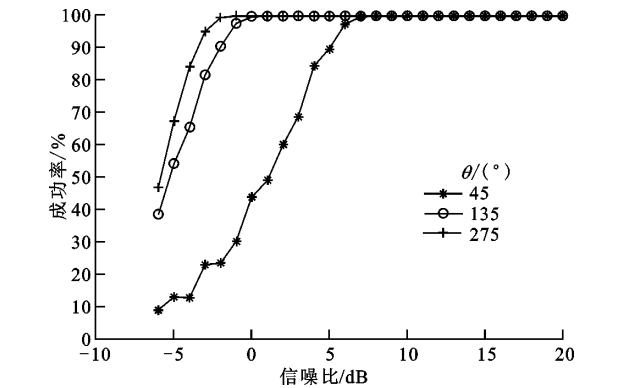


图 6 风向角估计成功率

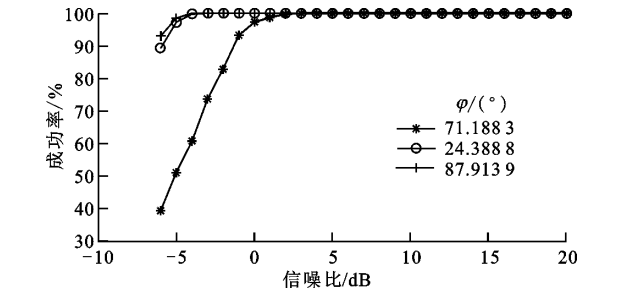


图 7 俯仰角估计成功率

果均方根误差 R_{MSE} 的仿真实验,实验条件与 2.2 小节相同。均方根误差的公式

$$R_{\text{MSE}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{ci} - \overline{x_c})^2}{n}}$$

(24)

式中: n 为实验次数; x_{ci} 为第 i 次仿真结果; $\overline{x_c}$ 为参数真值。3 组参数估计结果的不确定度随信噪比的变化情况如图 8~10 所示。

由仿真结果可知:在低信噪比条件下,速度的估计效果好于角度的估计效果;随着信噪比的增加,三维风参数的估计结果越来越趋向于真值,在信噪比

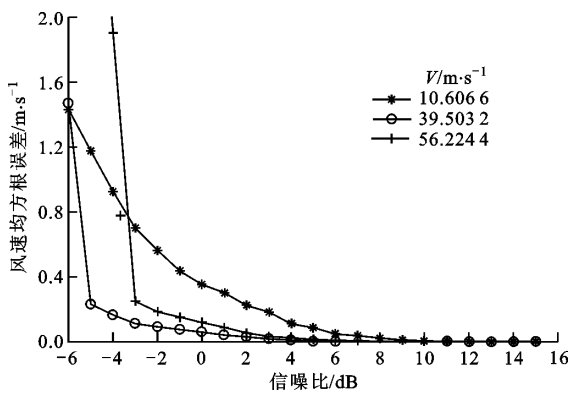


图 8 风速均方根误差

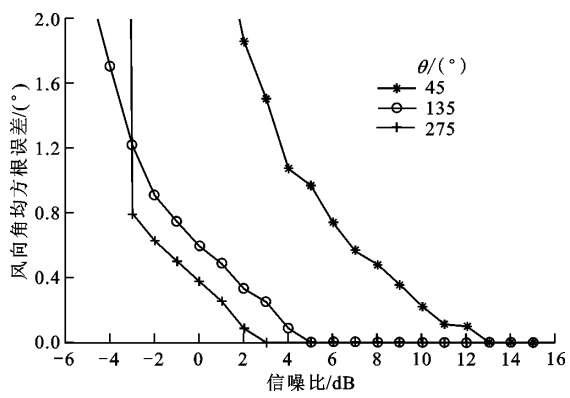


图 9 风向角均方根误差

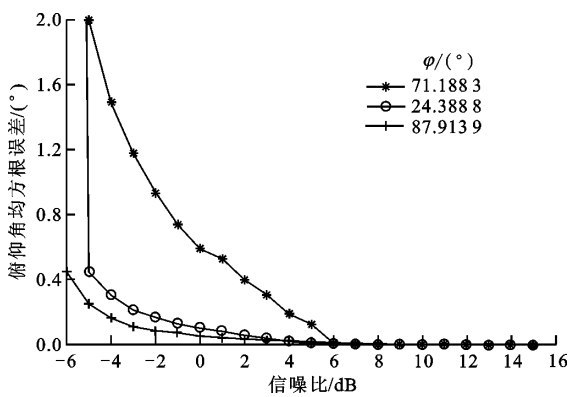


图 10 俯仰角均方根误差

(HY3005ET)为风机提供稳定的电压,可调稳压电源(HSPY-200-02)作为控制单元(ATMEGA328P)的电源,使控制单元发送频率为 40 kHz 的脉宽调制,并通过驱动电路驱动发射阵元发射频率为 40 kHz 的超声波信号。风洞的整体框架由透明的亚克力板制作而成,如图 12 所示。当测风装置置于风洞中时,发射阵元发射的超声波信号在空气中传播会受风的影响,从而传播速度发生变化,所以超声波信号在发射阵元和接收阵元之间的传播时间就会发生变化,具体表现为接收信号之间相位差的变化。本实验采用 4 通道同步采样的示波器(MSO7054B),同步采样频率为 20 MHz,每路信号最多可同时采集 1 000 个离散的数据点,保存成.csv 格式的文件。

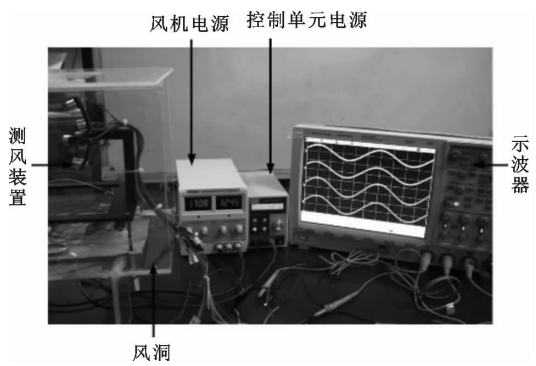


图 11 三维风参数测量实验平台

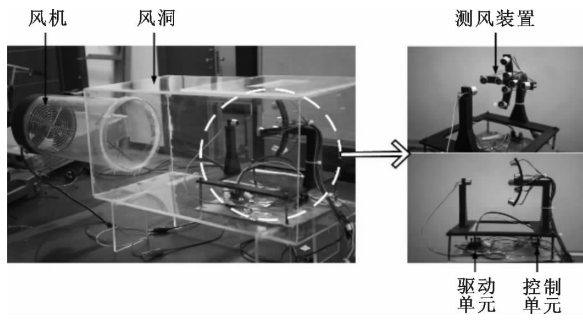


图 12 实验风洞

大于 5 dB 时,速度的均方根误差小于 0.1 m/s,角度的均方根误差值小于 1°。

通过以上 3 个仿真实验及仿真结果可知,本文所提的测风方法在理论上具有较好的三维风参数测量效果。

3 实验与结果

3.1 实验平台

为了验证本文提出的方法是否具有工程可实现性,搭建了基于超声波传感器阵列的三维风参数测量实验平台,如图 11 所示。直流可调稳压电源

3.2 风洞中的风参数测量实验

在采集信号之前,需要先将测风装置校准,使同一平面上 4 路通道所接收的信号在无风时保持同相。但是,由于没有精确的安装技术,在人为固定各超声波传感器的过程中,会存在较大的安装误差。经过一系列的结构调整和校准,无风时水平面 4 路接收信号在示波器上显示的波形如图 13 所示,可以看出,最终只能达到接收阵元 b_2 、 b_3 所接收的信号保持同相的水平。同时,在垂直面上只能保证接收阵元 a_2 、 a_3 所接收的信号保持同相。此时,接收阵元 b_2 、 b_3 、 a_2 、 a_3 接收的信号如图 14 所示。因此,在

后续的实验过程中,只利用接收阵元 b_2 、 b_3 、 a_2 、 a_3 所接收的数据进行运算。

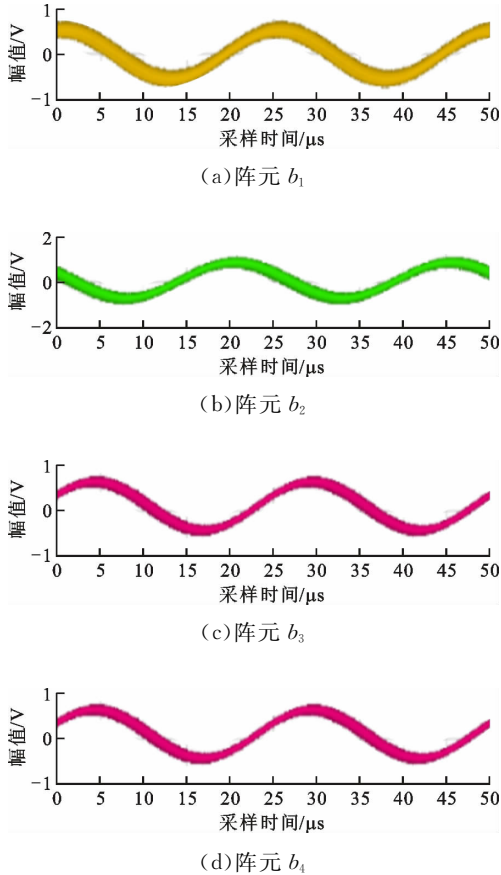


图 13 无风时水平面 4 路阵元接收信号的波形

有风时接收阵元 b_2 、 b_3 、 a_2 、 a_3 接收的信号如图 15 所示,可以看出,阵元 b_2 、 b_3 接收的信号和阵元 a_2 、 a_3 接收的信号之间出现明显的相位差。利用 Matlab 软件调用有风时的采样数据.csv 文件,便能计算出风洞中的三维风参数。测量环境的温度为 14.9°C ,根据式(1)可得此时的超声波声速 $c=340.323\ 6\ \text{m/s}$,利用该修正后的超声波声速及采样数据,计算可得测量的风洞中的三维风参数,结果如

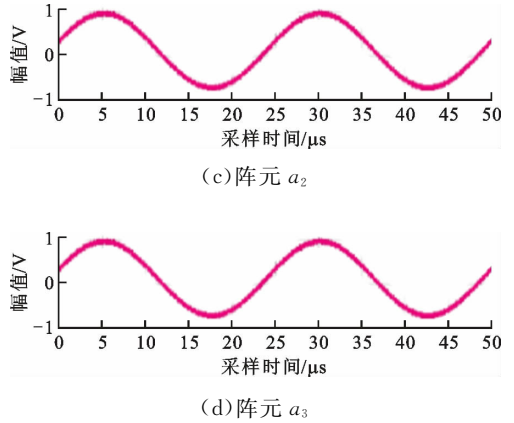
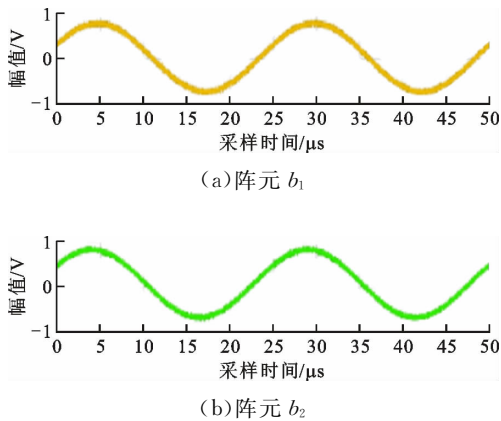


图 14 无风时接收阵元 b_2 、 b_3 、 a_2 、 a_3 接收信号的波形

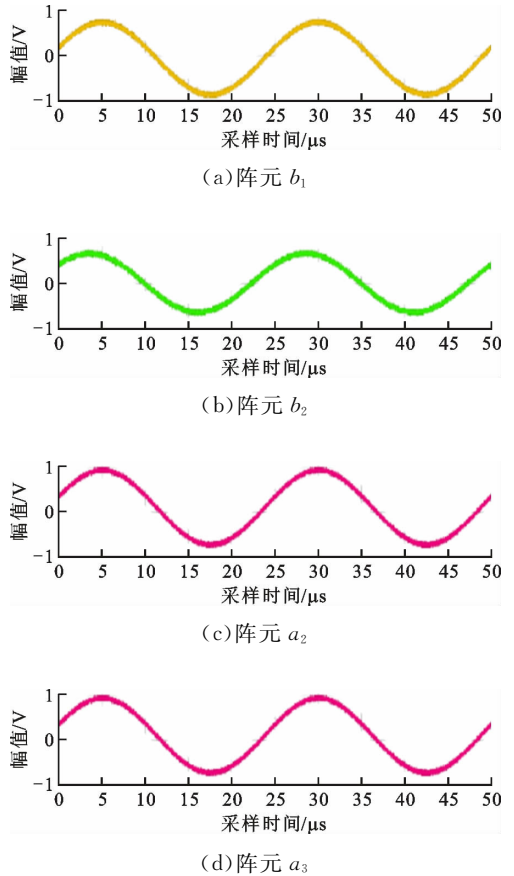


图 15 有风时接收阵元 b_2 、 b_3 、 a_2 、 a_3 接收信号的波形

表 2 所示。考虑到超声测风装置的安装误差以及实物实验测量中使用的接收阵元数量减半等因素的影响,超声测风装置测量的三维风参数相对于真值会不可避免地存在误差。由于风洞中风场的不稳定性和时变性,很难获得某时刻风参数的真值,因此可通过借助市场上的测风仪来测量风洞中风速的最大值,进行本文方法可行性的验证。由于采用机械式测风仪(SMART SENSOR AS8556)测量的风洞中

最大风速为 6.443 m/s,所以当本文实验平台测量的风速小于 6.443 m/s 且在其附近时,便认为是合理的。本文实验平台所测风速为 6.363 7 m/s,与机械式测风仪测量结果仅相差 0.079 3 m/s,因此本文所提测风方法是具有工程实现性的。风向角和俯仰角会因测风装置所处的位置和风洞中气流的变化而变化,所以本节不讨论。本节仅说明本文方法具有工程实现性,更精确的测量需要更专业的仪器在更高规格的实验室或机构中进行。

表 2 本文实验平台测量结果

参数	数值
水平面风速 $V_b/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	7.7
水平面风向角(空间风风向角) $\theta/(\text{^\circ})$	320
垂直面风速 $V_a/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	4
垂直面风向角 $\varphi_{\text{vaz}}/(\text{^\circ})$	263
空间风风速 $V/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	6.363 7
空间风俯仰角 $\varphi/(\text{^\circ})$	128.599 7

通过以上分析可知,在允许一定结构误差和设备误差的前提下,本文测风方法具有工程实现性。同时,如何克服结构误差和减小设备误差也是后续工作中需要努力改进的地方。

4 结 论

- (1)本文设计了一种新的超声波传感器阵列结构,并将波束形成算法应用于三维风参数测量中。
- (2)充分利用了超声波传感器阵列接收信号的冗余信息和波束形成算法的空域滤波、干扰抑制、期望信号增强等优点,在提高风参数的测量精度方面具有一定的理论优势。
- (3)通过 Matlab 软件对本文提出的三维风参数测量方法进行了仿真实验,结果表明,在信噪比大于 5 dB 时,三维风参数测量信息几乎能达到 100% 的成功率,风速的均方根误差小于 0.2 m/s,风向角的均方根误差小于 1°。
- (4)搭建了三维超声测风实验平台并对风洞中的风参数进行了实际测量,结果表明,本文系统与市场上成型的机械式测风仪的风速测量结果仅相差 0.078 3 m/s,说明本文方法具有工程可行性。

参考文献:

[1] ESPINOZA C E M, VILLANUEVA J M M, CATUNDA S Y C. Wind speed measurement and uncertainty analysis using ultrasonic sensors with Kalman

filtering [C] // 2010 IEEE Instrumentation & Measurement Technology Conference Proceedings. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2010: 624-628.

[2] 高伟. 基于超声波传感器阵列及多重信号分类算法的风速风向测量方法 [D]. 长春: 吉林大学, 2017: 1-7.

[3] 郭星辰. 三维超声波测风系统的设计 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2013: 1-3.

[4] 李春玉, 丁喜波, 邹一风. 相位差法超声波三维风速测量方法研究 [J]. 哈尔滨理工大学学报, 2016, 21(4): 45-49.

LI Chunyu, DING Xibo, ZOU Yifeng. Study of the ultrasonic three-dimensional wind speed measurement methods based on the phase difference [J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2016, 21(4): 45-49.

[5] CAMP D W, TURNER R E, GILCHRIST L P. Response tests of cup, vane, and propeller wind sensors [J]. Journal of Geophysical Research, 1970, 75(27): 5265-5270.

[6] ACRIVLELLIS M. Determination of the magnitudes and signs of flow parameters by hot-wire anemometry: part II Measurements using a triple hot-wire probe [J]. Review of Scientific Instruments, 1989, 60(7): 1281-1285.

[7] BUCHHAVE P, GEORGE W K, LUMLEY J L. The measurement of turbulence with the laser-Doppler anemometer [J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 1979, 11(1): 443-503.

[8] 张淳民, 相里斌, 赵葆常. 用 Fabry-Perot 干涉仪测量上层大气风场的速度和温度 [J]. 西安交通大学学报, 2000, 34(4): 97-99.

ZHANG Chunmin, XIANG Libin, ZHAO Baochang. Velocity and temperature measurement of upper atmosphere wind field using Fabry-Perot interferometer [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2000, 34(4): 97-99.

[9] KHYAM M O, GE S S, LI X D, et al. Highly accurate time-of-flight measurement technique based on phase-correlation for ultrasonic ranging [J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(2): 434-443.

[10] VILLANUEVA J M M, CATUNDA S Y C, FREIRE R C S, et al. Wind speed measurement based on time-of-flight estimation using extended Kalman filter [C] // 2013 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2013: 1182-1187.

[11] VILLANUEVA J M M, CATUNDA S Y C, TANS-CHEIT R, et al. Wind speed measurement data fusion

- of phase difference and time-of-flight techniques using ultrasonic transducers [C]// 2007 IEEE Instrumentation & Measurement Technology Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2007: 1-6.
- [12] 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 Yunyi, YAO Zhendong, LIU Kai, et al. Three-dimensional vector wind measurement system based on ultrasonic time-difference method [J]. Microcontrollers & Embedded Systems, 2016, 16(4): 25-28.
- [13] FRANK J M, MASSMAN W J, EWERS B E. A Bayesian model to correct underestimated 3-D wind speeds from sonic anemometers increases turbulent components of the surface energy balance [J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2016, 9: 1-48.
- [14] LOPES G M G, PEREIRA D S J D, DE FRANCA 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): 1-9.
- [15] LI Xinbo, SUN Haixin, GAO Wei, et al. Wind speed and direction measurement based on arc ultrasonic sensor array signal processing algorithm [J]. ISA Transactions, 2016, 65: 437-444.
- [16] 雷远. MUSIC 算法的研究及 DSP 实现 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009: 6-26.
- [17] 郑毅. 超声波三维测风系统的开发 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2014: 8-9.
- [18] 时德钢, 刘晔, 王峰, 等. 超声波测距仪的研究 [J]. 计算机自动测量与控制, 2002, 10(7): 480-482.
- SHI Degang, LIU Ye, WANG Feng, et al. Research of the ultrasonic distance-measure instrument [J]. Computer Automated Measurement & Control, 2002, 10(7): 480-482.
- [19] 张小飞, 汪飞, 陈伟华. 阵列信号处理的理论与应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2013: 33-40.
- [20] FROST O L. An algorithm for linearly constrained adaptive array processing [J]. Proceedings of the IEEE, 1972, 60(8): 926-935.

(编辑 陶晴 武红江)

(上接第 60 页)

- [7] 刘凯敏, 杨靖, 邓帮林, 等. 非同步气门正时对高速汽油机进气及燃烧过程的影响 [J]. 内燃机工程, 2016, 37(2): 94-100.
- LIU Kaimin, YANG Jing, DENG Banglin, et al. Effect of asynchronous valve timing on intake and combustion process of a high speed gasoline engine [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2016, 37(2): 94-100.
- [8] WU Z K, HAN Z Y. Numerical investigation on mixture formation in a turbocharged port-injection natural gas engine using multiple cycle simulation [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2018, 140(5): 051704.
- [9] LEE K, BAE C, KANG K. The effects of tumble and swirl flows on flame propagation in a four-valve S. I. engine [J]. Applied Thermal Engineering, 2007, 27(11/12): 2122-2130.
- [10] DENG B L, YANG J, ZHANG D M, et al. The challenges and strategies of butanol application in conventional engines: the sensitivity study of ignition and valve timing [J]. Applied Energy, 2013, 108: 248-260.
- [11] MOMENI MOVAHED M, BASIRAT TABRIZI H, MIRSALIM M. Experimental investigation of the concomitant injection of gasoline and CNG in a turbocharged spark ignition engine [J]. Energy Conversion and Management, 2014, 80: 126-136.
- [12] ZHAO J X, XU M. Fuel economy optimization of an Atkinson cycle engine using genetic algorithm [J]. Applied Energy, 2013, 105: 335-348.
- [13] ZHAO J X, XU M, LI M, et al. Design and optimization of an Atkinson cycle engine with the artificial neural network method [J]. Applied Energy, 2012, 92: 492-502.

(编辑 赵炜)