

基于超声波风速风向测速算法研究

帅师师¹, 王 露¹, 方 鑫¹, 陈 洋², 刘 泽²

(1. 中国电子科技集团公司第二十六研究所, 重庆 400060; 2. 重庆邮电大学 光电工程学院, 重庆 400065)

摘 要: 超声波在空气中传播时, 顺风与逆风时会存在一个速度差。在同等声程下, 通常测量风速的方法是相关法和相位差测量方法。该文通过比较两种方法的优缺点, 提出了一种新的改进算法来测风速, 将相关法和相位差算法结合, 并通过仿真来验证算法优越性。

关键词: 超声波; 风速风向; 相关法; 相位法

中图分类号: TP274.53 **文献标识码:** A

Study on the Algorithm of Wind Speed and Direction Measurement Based on Ultrasonic Wave

SHUAI Shishi¹, WANG Lu¹, FANG Xin¹, CHEN Yang², LIU Ze²

(1. 26th Institute of China Electronic Technology Group Corporation, Chongqing 400060, China;

2. Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: When the ultrasonic wave disseminates in the air, there will be a speed difference between the downwind and the upwind. In the same sound path, the correlation method and phase difference measurement method are usually used to measure the wind speed. By comparing the advantages and disadvantages of the two methods, this paper proposes a new improved algorithm to measure the wind speed, which combines the correlation method and phase difference measurement method. At last we validate the algorithm superiority by simulation.

Key words: ultrasonic wave; wind speed and direction; correlation method; phase method

0 引言

在自然界中, 风的产生具有随机性, 其方向、速度和大小具有随机性并随着高度的变化而变化^[1]。尽管风的产生具有随机性, 我们仍可根据风随着时间变化总结出一定的规律, 风的变化主要包括季节的变化和每日的变化, 从空气运动的角度通常将不同高度的大气层分为自由空气层、上部摩擦层、地面境界层 3 个区域。理论研究及实际观测表明, 地面境界层风随高度的变化不明显, 基本可忽略, 在海洋上的风压流、潮汐流、惯性流和黑潮流等海流, 以及船速、航线、载重引起的吃水变动、船舶姿态、航向等因素, 均会对风速风向的测量精度产生影响。船用风速风向测量传感器检测的是相对的风速风向, 需经过计算得到真风的风速风向^[2]。

风速风向仪作为国内外气象仪器研究的热点, 在民航、气象观测、新能源航运等领域有广泛应用。目前各行各业风速风向仪的种类较多, 原理也不尽相同, 常用的风速风向仪主要有螺旋桨式和丰碑式风速仪, 这种传统的机械式风速风向仪具有成本低、

使用普遍等优点。然而传统风速风向仪中存在转动部件, 易导致摩擦, 同时环境也会对其造成一定影响, 最终会导致测量结果精度不高, 使用地域受到限制。

相比于传统风速风向仪, 超声波测风技术是基于矢量法, 利用超声波信号在空气中传播时所载气体流动信息来测量风速风向的测量技术^[3]。超声波式风速风向仪具有体积小, 测量精度高, 无机械转轴, 使用寿命长等优点。主要应用在风能发电、气象和环境监测、高铁近地大风场监测等方面。超声波测量风速的一种常用算法是时间差算法, 其主要原理是利用发送声波脉冲, 测量接收端的时间或频率(多普勒变换)差别来计算风速风向。另一种常用测量风速算法是相位法, 其主要原理是通过观测顺风与逆风时波形相位差来计算风速。论文中提出一种新的测量风速风向的算法, 在一维风速风向模型的基础上, 建立二维风速风向模型来模拟实际场景测量风向, 对于风速测量, 则在采用相关算法的基础上, 结合相位法, 将实际采集到的正弦波形转化为方

收稿日期: 2015-05-05

作者简介: 帅师师(1981-), 女, 重庆永川人, 工程师, 硕士, 主要从事信号处理的研究。

波波形来观测效果。并通过仿真来计算延迟点数,从而得出延迟时间并计算风速,通过对比实际风速,来验证算法的可靠性。

1 超声波测风向模型

1.1 一维风向模型

系统假设 d 为两个收发传感器的间距, t_{12} 为顺风时探头 1~2 之间超声波传播的时间; t_{21} 为逆风时,两个探头间超声波传播时间是,模型假设 v_s 为超声波无风情况下传播速度, v_w 为风速,则可计算出风速为

$$v_w = \frac{d}{2} \left| \frac{1}{t_{21}} - \frac{1}{t_{12}} \right| \quad (1)$$

由式(1)可看出,实际测量风速时,在传感器探头距离已知的情况下,只需测量 t_{12} 和 t_{21} 即可。

1.2 二维风向模型

实际情况中,风速不会沿着一个方向,特别是海上气象站等较空旷的地方,为了模拟实际场景,建立的二维超声波风速风向仪测风模型如图 1 所示^[4]。采用相互垂直放置的收发一体的超声波探头,保证探头距离不变,并安装在同一水平面上,以固定频率发射超声波并测量两对探头的顺、逆风传播时间 t_{12} 、 t_{21} , t_{34} 、 t_{43} ,通过相关计算可得风速、风向的数值。此类超声测风探头所测得的风为平均水平风,在极坐标上表示出风速和风向,具体如图 2 所示^[3]。

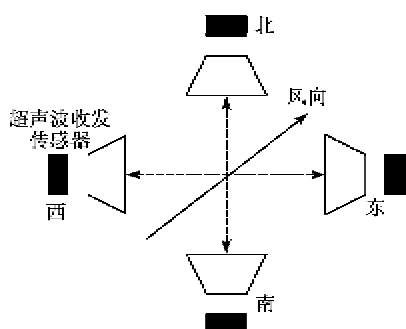


图1 超声波测速模型

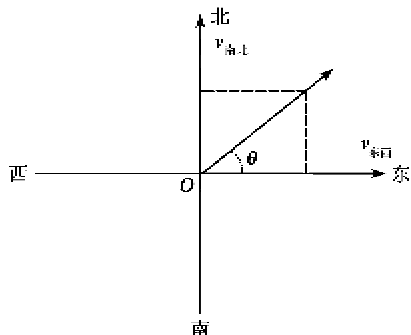


图2 坐标形式简化模型

设南北(或东西)两超声收发器的距离均为 d , 两对顺、逆传播时间 t_{12} 、 t_{21} , t_{34} 、 t_{43} , 设 t_{12} 为由西到东, t_{21} 为由东到西, t_{34} 为南到北, t_{43} 为由北到南, 东西为 v_{wx} , 南北为 v_{wy} , 则东西方向风速为

$$v_{wx} = \frac{d}{2} \left(\frac{1}{t_{12}} - \frac{1}{t_{21}} \right) \quad (2)$$

同理可求得南北方向风速:

$$v_{wy} = \frac{d}{2} \left(\frac{1}{t_{34}} - \frac{1}{t_{43}} \right) \quad (3)$$

再由矢量分解遵循勾股定理:

$$v_w^2 = v_{wx}^2 + v_{wy}^2 \quad (4)$$

将式(2)、(3)代入式(4)可得

$$v_w = \frac{d}{2} \sqrt{\left(\frac{1}{t_{12}} - \frac{1}{t_{21}} \right)^2 + \left(\frac{1}{t_{34}} - \frac{1}{t_{43}} \right)^2} \quad (5)$$

假设风速与水平方向(东)夹角是 θ , 则

$$\cos \theta = \frac{\frac{d}{2} \left(\frac{1}{t_{12}} - \frac{1}{t_{21}} \right)}{\frac{d}{2} \sqrt{\left(\frac{1}{t_{12}} - \frac{1}{t_{21}} \right)^2 + \left(\frac{1}{t_{34}} - \frac{1}{t_{43}} \right)^2}} \quad (6)$$

当风向从 $0^\circ \sim 360^\circ$ 变化时, 则有

$$\theta_w = \begin{cases} k\pi + \arccos \frac{\left| \frac{1}{t_{12}} - \frac{1}{t_{21}} \right|}{\sqrt{\left(\frac{1}{t_{12}} - \frac{1}{t_{21}} \right)^2 + \left(\frac{1}{t_{34}} - \frac{1}{t_{43}} \right)^2}} & \text{当 } t_{12} < t_{21} \text{ 且 } t_{34} < t_{43}, k=0; \\ k\pi - \arccos \frac{\left| \frac{1}{t_{12}} - \frac{1}{t_{21}} \right|}{\sqrt{\left(\frac{1}{t_{12}} - \frac{1}{t_{21}} \right)^2 + \left(\frac{1}{t_{34}} - \frac{1}{t_{43}} \right)^2}} & \text{当 } t_{12} > t_{21} \text{ 且 } t_{34} > t_{43}, k=1; \\ k\pi + \arccos \frac{\left| \frac{1}{t_{12}} - \frac{1}{t_{21}} \right|}{\sqrt{\left(\frac{1}{t_{12}} - \frac{1}{t_{21}} \right)^2 + \left(\frac{1}{t_{34}} - \frac{1}{t_{43}} \right)^2}} & \text{当 } t_{12} < t_{21} \text{ 且 } t_{34} > t_{43}, k=0; \\ k\pi - \arccos \frac{\left| \frac{1}{t_{12}} - \frac{1}{t_{21}} \right|}{\sqrt{\left(\frac{1}{t_{12}} - \frac{1}{t_{21}} \right)^2 + \left(\frac{1}{t_{34}} - \frac{1}{t_{43}} \right)^2}} & \text{当 } t_{12} > t_{21} \text{ 且 } t_{34} < t_{43}, k=1 \end{cases} \quad (7)$$

对于二维风速风向模型, 如果将风向量进行分解, 也就是 2 个一维矢量模型。

由二维风向模型公式可得以下两个结论:

1) 只需测得超声波顺、逆风的传播时间, 便可求出当前风速风向。

2) 超声波的传播速度受温度影响较大, 要想准确测量风速, 必须考虑温度影响。

2 风速测量算法

采用超声波进行风速测量常用方法主要有时差法、多普勒法和涡街风速测量法 3 种。

在二维超声波风速测量算法中,最常用的算法是超声波时间差法和相位差测量方法,时间差算法的基本原理是通过测量同等声程下超声波脉冲顺、逆风传播时间来计算风速,相位差测量法属于时差测量法,相比于直接时差法,该测量方法具有电路成本低、软件易实现等优点。

本文提出一种改进算法,即将相关法和相位算法结合,当相位差超过一个周期时,采用相关算法来计算延迟点数,当相位差在一个周期以内时,采用相位法来计算延迟点数,以确保延时点数能精确计算。

2.1 相关法

相关法的主要思路是在无风情况下以固定采样频率 f_s 来采集参考波形,通过正向采集波形后,将采集的波形与参考波形进行互相关运算,得出延迟点数,同样做法对反向波形进行采集,做互相关运算,即通过计算两组波形的相似度计算得到延迟点数。然后分别将正、反向计算出的延迟点数与 f_s 进行计算便可得出正、反向的延时,代入式(1)可得出风速。其过程如图3所示。

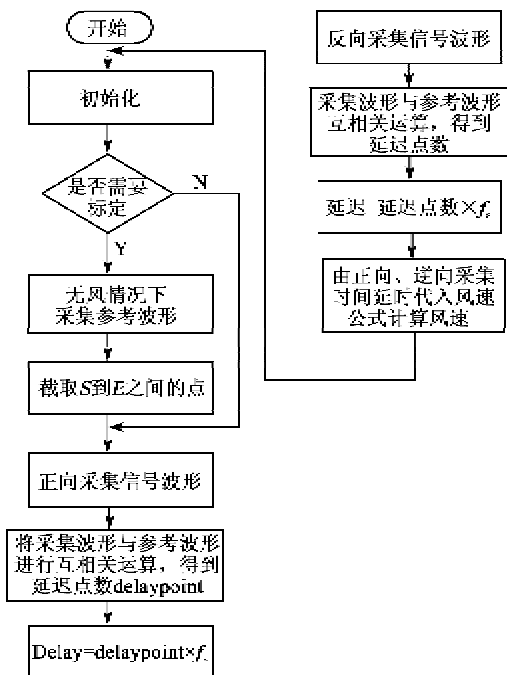


图3 相关法流程图

相关法测量精度高,抗干扰能力较强,受环境等因素影响较小,但超声波波形受温度影响较大^[6],且需两两互相关才能提高精度^[8]。

2.2 相位法

相位法测量风速主要基于相位延时,在无风时

采集参考波形,将采集到的正弦波转为方波以便于进行相位运算,然后分别正、反向采集一次波形,将采集波形变换为方波。分别和参考波形进行相位运算,得出正、反向的延迟点数,然后与 f_s 进行运算得出正、反向的延时时间,代入式(5)即可得出风速。相位法流程图如图4所示。图4中,将正弦波转为方波算法流程图如图5所示。

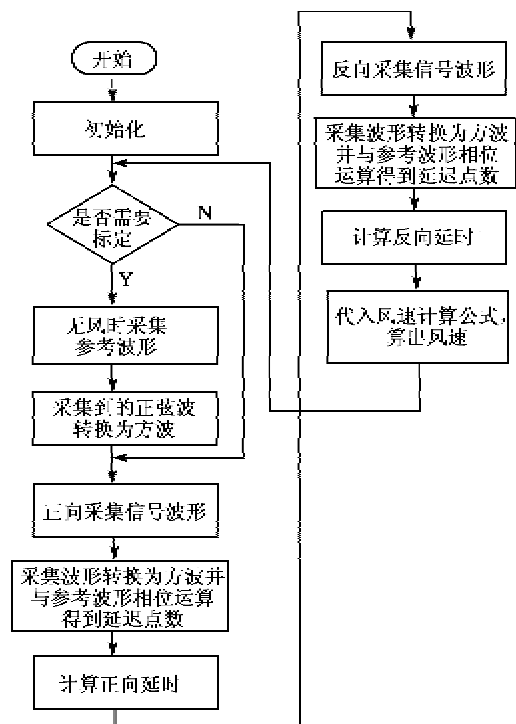


图4 相位法流程图

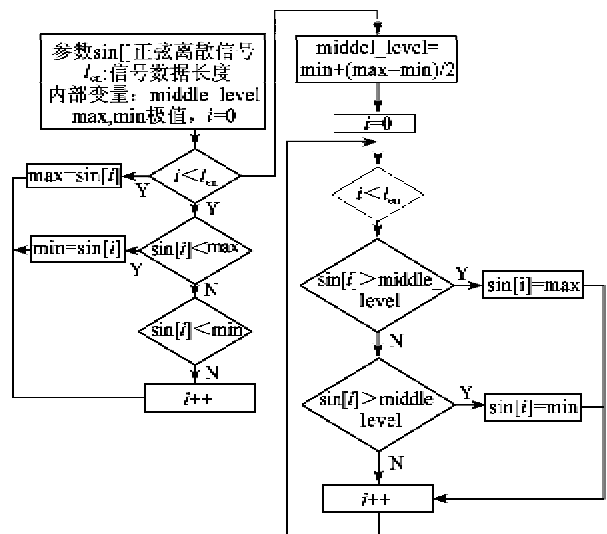


图5 正弦波转方波流程图

相位差法计算延迟点数流程图如图6所示。

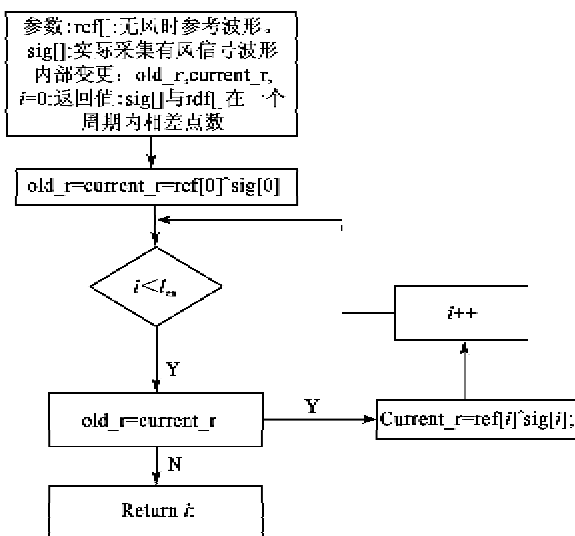


图6 计算延时点数流程图

相位法测量方便,且易计算一个周期内相差的点数,当相位差在一个周期内时,精度很高。但相位差超过一个周期时,该方法误差会很大。

3 仿真结果以及分析

通过用 MATLAB 对两种方法进行仿真,仿真场景及参数如表 1 所示。

表1 仿真场景设置

仿真工具	超声波传感器频率/kHz	采样频率/MHz
MATLAB	300	2
采样点数	收发传感器距离/m	风速/(m/s)
1 024	1	2.75

首先对互相关法进行仿真,用 MATLAB 采集到的无风时波形如图 7 所示。然后分别对顺、逆风情况下进行波形采集,顺风时采集到的波形如图 8、9 所示。将顺、逆风情况下的波形与参考波形分别进行互相关运算,得出延时点数,而 f_s 是已知的,可根据公式得出顺、逆风情况下的延时时间。代入式(1)可得风速约为 2.71 m/s。用相位法测量风速时,无风时采集到的参考波形如图 10 所示。

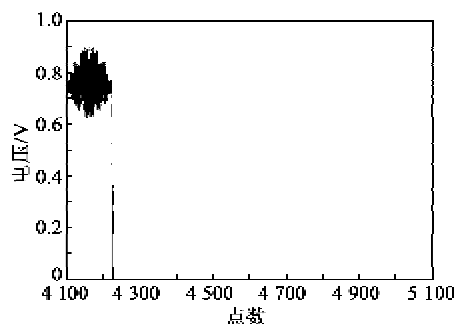


图7 无风时采集到的波形

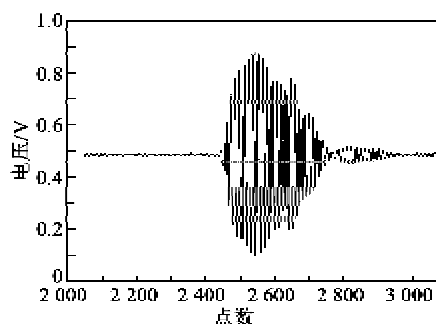


图8 顺风时采集到的参考波形

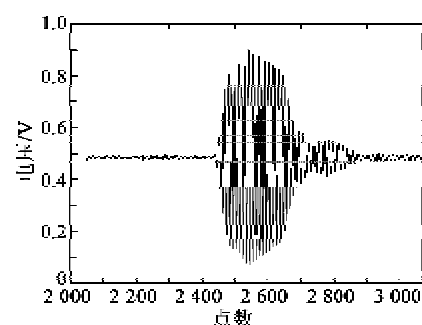


图9 逆风时采集到的波形

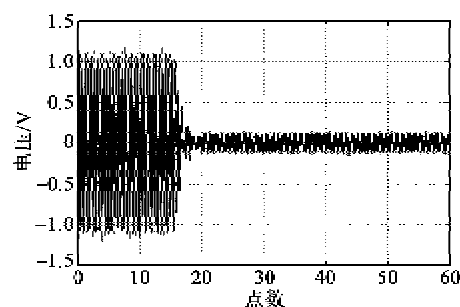


图10 无风时采集到的波形

相位法需将正弦波转为方波,以方便进行相位运算,具体流程参见图 5,图 11 为转换为方波后采集的波形图。

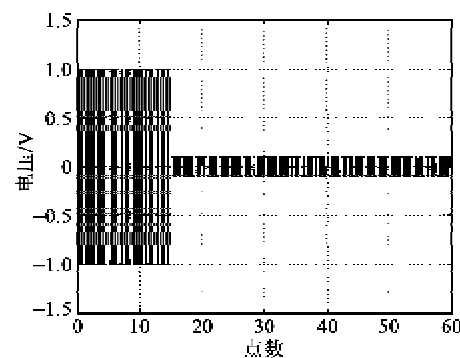


图11 将正弦波转为方波后波形图

转换为方波后,需对顺、逆风情况下进行波形采集,采集两个波形如图 12、13 所示。

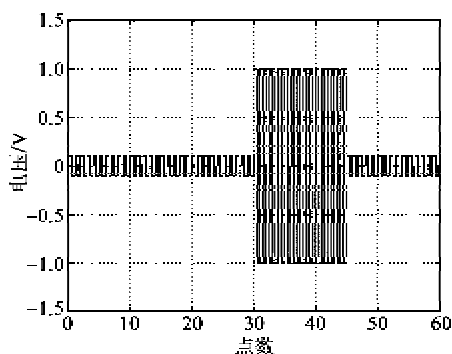


图 12 顺风时采集到的波形图

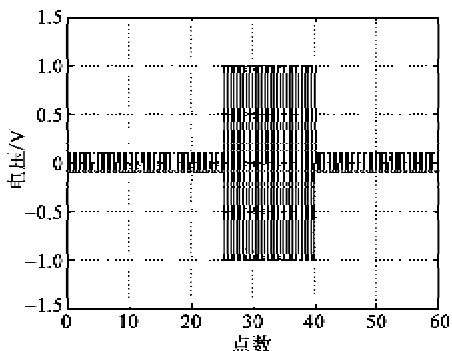


图 13 逆风时采集到的波形图

同样在顺、逆风情况下,将采集波形分别和参考波形进行相关运算,可计算出延时点数,根据延时点数与 f_s 计算顺、逆风的延时,然后代入风速公式可得风速约为 2.72 m/s。

将相位法和相关算法计算的风速与实际仿真中设定的风速进行比较,得出实际误差分别为 1.45% 和 1.10%。

相位法适用于相位差在一个周期以内情况,实际相位差超过一个周期时,相位法测量风速效果将

变得很差,实际测量风速时,可将相关法和相位法相结合,当相位差在一个周期以内时,采用相位法测量风速较精确,相位差超过一个周期时,相关法变得更有效。

4 结束语

针对风速风向测试,论文中建立二维测量风向的模型,并给出公式计算风向角度,对于风速测量通过对相关法和相位差法进行仿真,并对两种测量风速的方法进行对比,提出两种方法结合的思想,在相位差超过一个周期时采用相关法,相位差在一个周期内时,采用相位法来计算延时点数。并通过仿真计算延时点数,得出风速并与实际风速进行比较,通过仿真验证了算法的可靠性。

参考文献:

- [1] AZMANI M, REBOUL S, CHOQUEL J B, et al. A recursive change point estimate of the wind speed and direction[C]//S. I.; IEEE 7th International Conference on Computational Cybernetics, 2009: 51-56.
 - [2] 王国峰, 赵永生, 范云生. 风速风向测量误差补偿算法的研究[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(4): 786-790.
 - [3] 王保强, 李一丁. 超声波风速风向检测技术的研究[J]. 声学技术, 2008, 27(4): 1-5.
 - [4] 吴宗玲. 超声波风速风向仪的设计与研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.
 - [5] 罗中兴. 基于 DSP 的超声波风速风标测量系统研究[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2009.
 - [6] 谢达. 基于超声波传感器的风速测量方法研究[D]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2013.
-
- (上接第 467 页)
- [4] 刘利华. 数字式超声波除垢设备: 中国, 101108384B [P]. 2011-04-13
 - [5] 严锦璇, 杨治中, 严卓理. 一种弯曲振动式超声棒: 中国, 201020440Y[P]. 2008-02-13