

振幅変調超音波を用いた位相差法にもとづく風速計測

Wind speed measurement based on phase shifts of amplitude-modulated ultrasonic wave

○和田 琉誠*, 佐藤 淳**

○Ryusei Wada*, Atsushi Satoh**

*岩手大学大学院, **岩手大学

*Graduate school of Iwate University, **Iwate University

キーワード： 超音波風速計測 (Ultrasonic wind speed measurement), 直交検波 (Quadrature detection), 振幅変調 (Amplitude modulation)

連絡先： 〒020-8551 岩手県盛岡市上田4丁目3-5 岩手大学理工学部 システム創成工学科 佐藤 淳
Tel./Fax.:019-621-6404, E-mail: satsushi@iwate-u.ac.jp

1. はじめに

現在市販されている超音波風速計のほとんどは超音波パルスの伝播時間から風速を算出しているが、原理的に計測周期を短くするには制限がある。そのため航空機の対気速度計への応用などを考えると、飛行制御系の制御周期と整合する ms オーダの周期での計測も可能な位相差法にもとづく計測がより適している。

位相差法¹⁾は、超音波送信器から連続波（正弦波信号）を送出し、受信した信号との位相差から音波の伝播時間を求め風速を算出する。しかし伝播に伴う位相差が 2π を超えるときは、計測される位相差に波数の不確定性が生じるため、風速の変化によって波数が変化しない程度に計測レンジを制限しなければならない欠点があった。これは位相差法で計測レンジを広げるには低周波（可聴域）の音波が必要となることを意味し、環境からの音響雑音を考えると実用的ではない。

位相差法は超音波距離計測の分野でも用いられるが、馬ら²⁾、下河辺ら³⁾は波数が0に確定するような低周波信号で振幅変調した超音波から始め、徐々に高い周波数の信号で変調した超音波へ切り替えながら波数を推定することで、最終的に無変調の超音波の位相の波数を確定する手法を提案している。そこで本研究では上記の結果に着想を得て、波数を確定できる十分低周波の信号（変調信号）で振幅変調した超音波連続波を使用し、その位相差から無変調信号成分（キャリア信号）の波数を推定して風速計測を行う方法を提案する。提案手法では変調信号の周波数の切り替えは行わず、直交検波により変調信号とキャリア信号の位相差を同時に計測する点が既存手法とは異なる。キャリア信号の周波数は使用する超音波トランスデューサの仕様に従うが、変調信号の周波数は予め設定した風速計測レンジで波数の変化が生じないように選択できる。また提案手法にもとづき風速計測実

験を行った結果を報告する.

2. 計測原理

2.1 位相差法

距離 L で対向するように超音波送信器および受信器を配置する. 送信信号 v_t と受信信号 v_r は周波数 ω の正弦波とすれば次式のように表される. ただし振幅の変化は無視している.

$$v_t = \sin(\omega t) \quad (1)$$

$$v_r = \sin(\omega t - \theta) \quad (2)$$

ここで θ (以後「絶対位相」と呼ぶ) は音波が送受信機間を伝播するのに要した時間を送受信信号の位相差として表したものである. 静止大気中の音速 c および伝播軸方向の風速成分 V を用いて θ は次のように表される.

$$\theta = \frac{\omega L}{c + V} \quad (3)$$

しかし受信信号から確定できる位相は $[0, 2\pi)$ の範囲であり, これを ψ (以後「観測位相」と呼ぶ) とおくと絶対位相は適当な整数 N を用いてのように表わされる.

$$\theta = 2\pi N + \psi \quad (4)$$

N は何らかの手段で別途推定する必要がある. (3) 式より風速 V は θ の関数として表される.

$$V = \frac{\omega L}{\theta} - c \quad (5)$$

2.2 振幅変調信号を用いた絶対位相の推定

変調信号 v_s の周波数を ω_s , キャリア信号 v_c の周波数を $\omega_c > \omega_s$ とすれば, 振幅変調信号 v_{am_t} は以下のように表される.

$$v_s = \sin(\omega_s t) \quad (6)$$

$$v_c = \sin(\omega_c t) \quad (7)$$

$$v_{am_t} = (\sin(\omega_s t) + 1) \sin(\omega_c t) \quad (8)$$

また v_{am_t} を送信信号にする時, 受信信号 v_{am_r} は次のようになる.

$$v_{am_r} = (\sin(\omega_s t - \theta_s) + 1) \sin(\omega_c t - \theta_c) \quad (9)$$

ここで v_{am_r} に v_c を参照信号とした直交検波 (同期検波)⁴⁾ を行うことでキャリア信号の観測位相 ψ_c の計測および $\sin(\omega_s t - \theta_s)$ の復調を行う. また $\sin(\omega_s t - \theta_s)$ に対して v_s を参照信号とした直交検波を行い変調信号の観測位相 ψ_s を計測する. 変調信号およびキャリア信号の絶対位相は次式のように表される.

$$\theta_s = 2\pi N_s + \psi_s \quad (10)$$

$$\theta_c = 2\pi N_c + \psi_c \quad (11)$$

このとき風速計測範囲で N_s が確定するように ω_s が選ばれていると仮定すれば (10), (11) 式より N_c が求まる. なお実際に計測される観測位相は誤差を含み, N_c は整数値にならないため丸めを行い N_c を推定する.

$$N_c = \frac{1}{2\pi} \left\{ \frac{\omega_c}{\omega_s} (2\pi N_s + \psi_s) - \psi_c \right\} \quad (12)$$

N_c の推定値が求まれば (11) 式の θ_c を用いて風速 V は (5) 式から求まる.

3. 計測実験

岩手大学環境風洞において計測実験を行い、§2.2で提案した推定法の確認を行った。1組の超音波送受信器からなる計測部 (Fig 1) を作成し、超音波トランスデューサは Table 1 のものを使用した。



Fig. 1 計測部

計測部をのせたプレートの中心を原点とするプレート固定座標系 (ξ, η) および原点を共有する風洞固定座標系 (X, Y) を定義する。 X 軸は風洞の流れ V と平行にとる。プレートは中心周りに回転することができ、計測部に対する相対的な流れの向きを変えることができる。 X 軸からの回転角を ϕ とすれば、 (ξ, η) 座標系から見た風向は $-\phi$ となる。

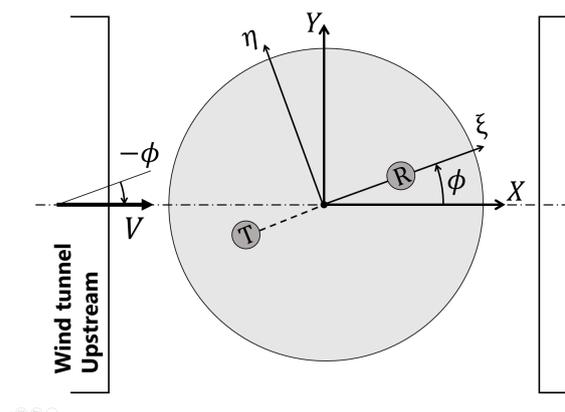


Fig. 2 座標系の定義

Table 1 超音波トランスデューサ⁵⁾

メーカー	Pro-Wave Electronic Corp.
型番	250ST160 (Transmitter) 250SR160 (Receiver)
共振周波数	25 ± 1 kHz
帯域幅	2 kHz

音速 c は気温 T [K] より次の音速モデルから算出した値を使用する。

$$c = \sqrt{\kappa \frac{RT}{M}} \quad (13)$$

Table 2 物理定数

空気の比熱比 κ	1.403
空気の分子量 M	2.8966×10^{-3} kg/mol
気体定数 R	8.314462 m ² kg/s ² /K/mol

Table 3 計測条件

キャリア周波数 ω_c	25 kHz
変調周波数 ω_s	1.84 kHz
センサ間距離 L	0.28 m
風洞の設定風速 V_{ref}	15 m/s
プレート回転角 ϕ	$-350^\circ \sim 0^\circ$ (-10° 刻み)

Table 3 に示す条件で、風向を変化させてキャリア信号、変調信号、振幅変調信号 (送信信号) および受信信号を A/D 変換器 (CONTEC AI-1204Z-PE) で風向毎に 1 秒間計測し (変換周期 1us), 観測位相は 1 秒間の積分を利用した。振幅変調信号の変調度は 100% とし、送信器は $20V_{pp}$ の正弦波で駆動した。絶対位相推定における N_c の整数値への丸めには MATLAB の round 関数を用いた。

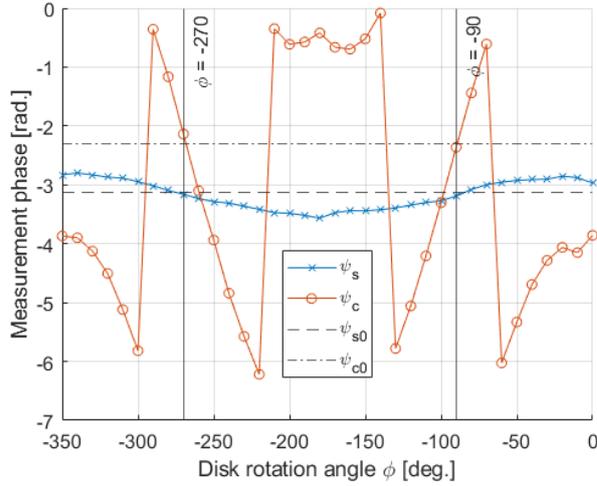


Fig. 3 観測位相 [rad.]

単一周波数を用いた風速の計測範囲は観測位相 $\psi \in [0, 2\pi)$ と無風時の波数 N_0 より (14) 式で表される.

$$V \in \left(\frac{\omega L}{2\pi(N_0 + 1)} - c, \frac{\omega L}{2\pi N_0} - c \right] \quad (14)$$

$$N_0 = \left\lfloor \frac{\omega L}{2\pi c} \right\rfloor \quad (15)$$

今回利用した周波数の無風時の位相遅れ, 波数および風速計測範囲を Table 4 に示す. ただし $c = 343$ m/s とした.

Table 4 無風時位相遅れと風速計測範囲

周波数	位相遅れ (波数)	風速範囲
25 kHz	41π ($N_{0c} = 20$)	$V_c \in (-9.7, 7.0]$
1.84 kHz	3π ($N_{0s} = 1$)	$V_s \in (-85, 172]$

計測位相 ($-\psi$), N_c の推定結果, ξ 軸方向風速の計算結果を Fig 3~5 に示す. Fig 5 の V_c はキャリア信号単独の観測位相による算出風速である. また V_ξ は提案手法にもとづいて算出した風速である. 提案手法はキャリア信号の位相が 2π 以上変化しても変調信号の位相から絶対位相を推定できていることが確認できる.

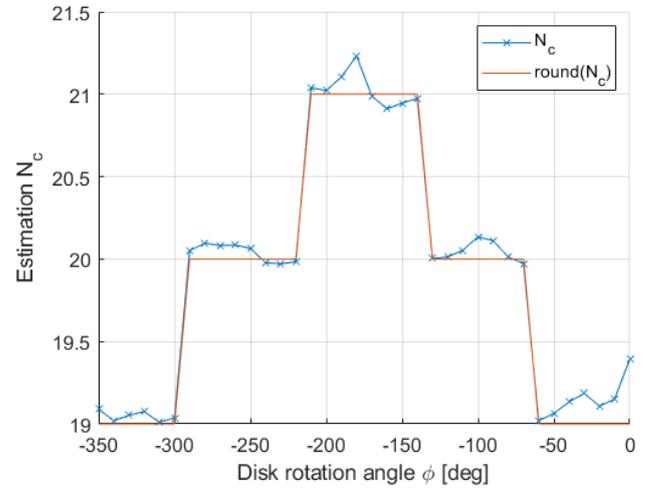


Fig. 4 N_c の推定

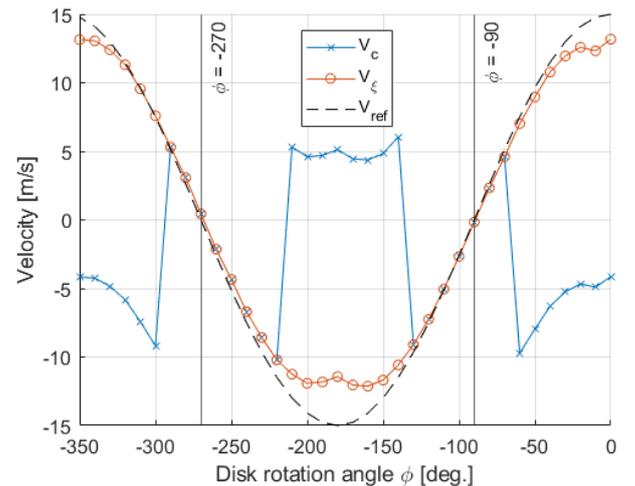


Fig. 5 ξ 軸方向風速 [m/s]

4. おわりに

本研究では位相差法による超音波風速計測における波数の不確定性の問題を解決するために、振幅変調した超音波連続波を用いてその変調信号とキャリア信号の位相差から送受信信号の位相差に含まれる波数を確定する方法を提案した。これにより位相差法を用いた風速計測の計測レンジを拡大することが可能であることを、岩手大学環境風洞を用いた2次元風速計測実験により検証した。

参考文献

- 1) 超音波便覧編集委員会 編：超音波便覧，丸善，東京 (1999)
- 2) 馬・下河辺：超音波多重位相差方式による3次元座標の測定，精密工学会誌，52(2)，pp. 332-337 (1986)
- 3) 下河辺・馬：断続超音波の多重位相差による3次元座標の測定，精密工学会誌，53(9)，pp. 1408-1413 (1987)
- 4) 竹下・吉川：通信工学，コロナ社，(2010)
- 5) Pro-Wave Electronic Corp. : Air Ultrasonic Ceramic Transducers 250ST/R160, <http://www.prowave.com.tw/english/products/ut/open-type/250s160.htm>