

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 22 日現在

機関番号：14501

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K14264

研究課題名（和文）パルス信号間のコヒーレント性に着目した移動流体速度を精密に計測する試み

研究課題名（英文）Accurate and Precise Velocity Measurement of Moving Fluid using Coherency between Adjacent Pulses

研究代表者

河口 信義（KOUGUCHI, Nobuyoshi）

神戸大学・海洋底探査センター・教授

研究者番号：90234690

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,100,000円

研究成果の概要（和文）：送受信パルス間の周波数偏移量を計測する従来方式の速度計測値と計測時における受信信号のSNRを用いて、最適と考えられる「不確かさの範囲」を算出し、その最適な「不確かさの範囲」に従って隣接パルスの送信時間間隔差分を変える適応的なコヒーレント方式ドップラー速度計測法を提案した。さらに、その計測精度と誤差量を解析的および数値的に示し、提案手法の解析的および数値的な評価を実験検証するため、屋内に設置した簡易水槽に計測装置を設置した実験を実施し、本提案手法を用いることで「波数の不確かさ」が小さくかつ精密な速度警告が可能であることを示し、新たに提案した測定方式について特許出願を行った。

研究成果の概要（英文）：Conventional, usually used, Doppler sonar, though unlimited by velocity range ambiguity, takes seconds to return valuable velocity readings. Coherent Doppler sonar has been proposed to provide accurate velocity with short time lag for current or turbulent. However, the velocity ambiguity seriously limits its general application. In this research, combined Doppler sonar had been proposed to overcome the disadvantages of both conventional and coherent Doppler sonars. An adaptive algorithm was used for combined Doppler sonar to provide accurate and precise velocity information at a wide range of SNRs. Experiments were carried out to evaluate the performance of combined Doppler sonar proposed. Based on experimental results, with suitable ambiguity velocities, combined Doppler sonar would provide accurate and precise velocity information at a wide range of SNRs. Additionally, we applied for a patent about our proposed method.

研究分野：海洋計測

キーワード：精密速度計測 ドップラー方式 コヒーレントドップラーソナー 波数の決定

1. 研究開始当初の背景

現在、洋上および海中移動体の速度を計測する方法には

- (1) 電磁式による流体速度計測
- (2) ドップラー式による流体速度計測
- (3) GPS による移動体速度計測

などが考えられている。(1)、(2)は洋上および海中で用いることができるが、その計測精度は±0.2 ノット (10cm/秒) 程度で航海者が接岸時や定点保持などに用いる場合に十分な精度ではない。

(3)の GPS 計測速度は計測精度が(1)、(2)と比べると 1cm/秒と 10 倍の精度が実現可能であるが、自立的でなく海中でも用いることが出来ない。そこで、本研究によって自立かつ海中でも用いることが可能な高精度な速度情報を提供するシステムを構築することを目的とする。

2. 研究の目的

従来から用いられている波動現象のドップラー効果による周波数シフト量を計測することで得られる移動体の粗な移動速度情報を得ると同時に、連続した送信パルス信号間のコヒーレント性 (位相整合性) から求まる位相付加情報による精密移動速度を計測し、本研究はこれら粗と精密な速度情報を適切な処理方法を開発し、実験的な検証を行う。近年、水中音響機器の位相制御技術が進展するに伴って、送信信号間パルスの位相を整合することが容易になり、現在用いられているドップラー速度計の計測精度を 10 倍程度改善すること期待できる可能性があることから、その適切な処理方法を考案し基礎的な評価を行うことで、世界に先駆けた精密なドップラー流速計の研究開発を目指す。

3. 研究の方法

(1) 適切な音響パラメーターと 3 次元弾性 FDTD 法 (有限差分時間領域法) などによる数値計算によって、連続する 2 つの送信パルス波間のコヒーレント性が確保されている場合における位相変化量ならびにドップラーシフトによる周波数偏移量、適切と考えられる幾つかの送信周波数、パルス波形を用いて評価する。

(2)はじめに研究計画の(1)で決定した送信パルス波形を構成し、それに従った超音波を送波器から送信する。同時に、送波器は FA 用移動ガイドを用いて、予め決められた精密な速度で移動させる。この超音波を受波器によって受信し、データ収録装置で記録する。その後、データ解析を行う。

(3)学内係船池および周辺海域での洋上実験において、1cm/秒の速度計測精度を有する GPS 姿勢・速度計および送波器を小型船に設置し、受波器およびデータ収録装置を陸上側に固定する。小型船を移動させて、精密速度を GPS 速度計で計測すると同時に、本システムにおけるドップラーシフト

による周波数偏移量および位相変化量を同時に計測し、実験結果を比較検討する。

(4) 数値シミュレーション、室内実験および洋上実験結果を検討し、更に改良を加えて計測システムを実用レベルに向けた応用的な検討を行い、基盤研究への発展を試みる。

4. 研究成果

本研究の提案方式は、現在用いられている従来方式とコヒーレント方式を併用することによって精密な速度計測を実現しており、以下に計測・処理の手順を列挙する。

- (1) 従来方式のソーナーで移動目標物の粗速度と受信信号の信号対雑音比を得る。
- (2) 受信信号の信号対雑音比から最適な (速度計測誤差の最小規範) 「不確かさの範囲」を求める。
- (3) 得られた「最適な不確かさの範囲」から隣接する 2 パルスのパルス時間間隔差分を求め、そのパルス時間間隔差分で送波する。
- (4) 隣接する 2 パルスの位相差を計測・処理し、精密な速度 v_h を求める。
- (5) 得られた「最適な不確かさの範囲」を変数変換し、波数の最確値として整数 \hat{n} を求める。
- (6) 波数の曖昧さを取り除いた精密速度が得られる。

ここでは、上記手順で示した、適応手法を用いない提案手法 (CMDS using fixed ambiguity velocity)、従来型 (CNDS) 及び理想的なコヒーレント手法 (CHDS) の 3 種類について理論値を求め、受信信号の信号対雑音比 (SNR) に対する計測速度の誤差について、本研究で提案する適応手法を用いコヒーレント手法 (CMDS using adaptive algorithm) による理論値と比較検討を行った。

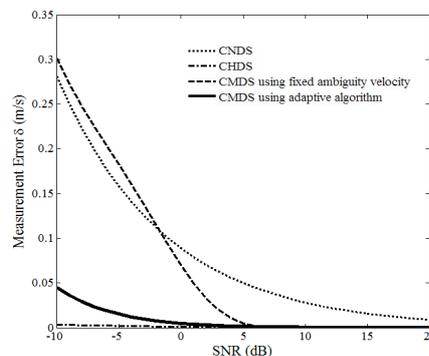


図1 受信信号 SNR に対する理論的な計測誤差

図1に4つの手法を用いた場合に、受信信号におけることなる SNR に対して計測された速度の誤差を示す。この図では実現が困難な CHDS の計測誤差にどこまで近づけることができるかを示しており、本研究の手法を用いることで、理論的な誤差解析の結果からは SNR の広い範囲で理想的な CMDS に近づけるべく計測誤差を小さく抑えることができることを示している。

次に、理論値に数値計算による結果を加えて比較検討する。図2に図1で示した4種類の手法による計測誤差について数値計算を行い、それらを加えた結果を図2に示す。

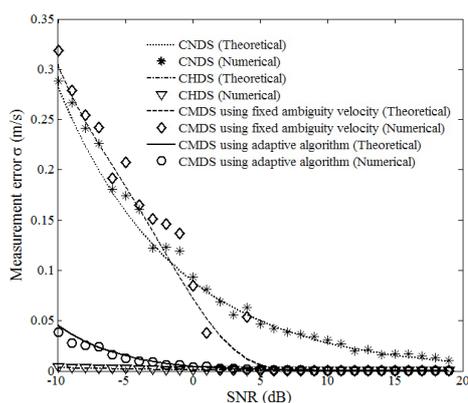


図2 受信信号 SNR に対する理論的及び数値計算による計測誤差

このように、理論的にも数値計算においても本研究で提案した手法を用いることで、理想的な CHDS の計測誤差に近づけることが可能である。

最後に、実験的に計測誤差を評価するため2016年1月26日から30日の5日間、本研究科所属大型実験水槽において実験を行った。表1に実験諸元を、図3に実験結果を示す。

表1 実験条件

送波波形	Square
パルス長 (ms)	0.6
搬送波周波数 (kHz)	200.0
サンプリング周波数 (MHz)	10.0
音速 (m/s)	1500.0

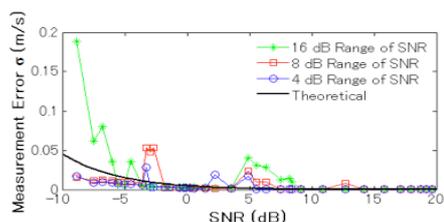


図3 簡易実験結果

図3で示した実験結果より、提案方式によるドップラーソナーが高精度で精密な速度計測が達成されていることがわかる。

波数の曖昧さを取り除いたコヒーレント方式ドップラーソナーの手法による速度計測を実験的に評価するため、理論値、数値計算及び屋内水槽に実験装置を設置して実施し、実験結果を示した。実験結果から静的な計測では、提案方式が理論値に近い計測結果が達成されたが、動の実験においてはまだ十分な実験結果を得ていない。そこで、今後さらに引き続き反射信号及び動的な実験結果を示すことで、本方式による精密な移動速度計測の評価を行う必要がある。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計5件)

- ① 河口信義, コヒーレントドップラー方式による速度計測, 超音波テクノ, 査読無し, No.3, pp.13-17, 2017.
- ② 河口信義, 劉鳳, 屋内水槽におけるコヒーレントドップラーソナーの速度計測実験結果について, 海洋音響学会講演論文集, 査読無し, pp.5-8, 2016.
- ③ P. LIU, N. KOUGUCHI and T. KUBOTA, Experimental Results of Combined Method of Conventional and Coherent Doppler Sonar, Proceedings of the Oceans '15 IEEE Washington D.C., 査読無し, 5 pages (CD), 2015.
- ④ P. LIU and N. KOUGUCHI, Adaptive Algorithm for Combined Method of Conventional and Coherent Doppler Sonar, Proceedings of the Oceans '15 IEEE Genova, 査読無し, 6 pages (CD), 2015.
- ⑤ P. LIU and N. KOUGUCHI, Measurement Error Analysis of Combined Doppler Sonar using Adaptive Method, 海洋音響学会誌, 査読有り, Vol.42, No.1, pp.39-40, 2015.

[学会発表] (計3件)

- ① 河口信義, 劉鳳, 屋内水槽におけるコヒーレントドップラーソナーの速度計測実験結果について, 海洋音響学会講演会, 東京大学生産技術研究所 (東京都), 2016.
- ② P. LIU, N. KOUGUCHI and T. KUBOTA, Experimental Results of Combined Method of Conventional and Coherent Doppler Sonar, Oceans '15 IEEE Washington D.C., Washington D.C. (アメリカ), 2015.
- ③ P. LIU and N. KOUGUCHI, Adaptive Algorithm for Combined Method of Conventional and Coherent Doppler Sonar, Oceans '15 IEEE Genova (イタリア), 2015.

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 1 件）

名称：ドプラ速度計及び速度計測方法
発明者：河口信義，劉鳳
権利者：神戸大学
種類：特許
番号：特願 2015-085397
出願年月日：2015 年 4 月 17 日
国内外の別：国内

○取得状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

河口 信義 (KOUGUCHI, Nobuyoshi)
神戸大学・海洋底探査センター・教授
研究者番号：90234690

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者

(4) 研究協力者

久保田 崇 (KUBOTA< Takashi)
劉 鳳 (LIU, Pen)
井川 晶裕 (IKAWA, Akihiro)