

令和元年6月14日現在

機関番号：10106

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K18099

研究課題名（和文）水中音響通信方式における耐ドップラーシフト頑健性の研究

研究課題名（英文）A Study of Doppler Shift Robustness in Underwater Acoustic Communication Systems

研究代表者

吉澤 真吾（YOSHIZAWA, Shingo）

北見工業大学・工学部・准教授

研究者番号：20447080

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,600,000円

研究成果の概要（和文）：水中音響通信において、通信装置を搭載した船舶や水中探査機が移動する状況ではドップラーシフトの影響を受け、通信が不安定となることが問題となる。本研究では耐ドップラーシフト性を実現するための通信方式における信号処理手法を研究した。受信機側で複数のリサンプリングレートで同時処理して最尤データ選択をする手法を提案し、送信機が不規則に移動する状況下でも安定的な通信を実現した。提案手法の有効性を計算機シミュレーション、プール試験及び海域試験により検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

水中音響通信において、従来研究では通信装置が一定速度を移動するときに発生するドップラーシフトのみに対応していたが、不規則に移動する場合についての対応はほとんど研究されていなかった。本研究は通信装置が不規則に移動するドップラーシフトにも対応することができた。本研究成果の手法は水中ロボットの遠隔操作における無線通信手段を実現する上で有用であると考えられる。

研究成果の概要（英文）：In underwater acoustic communication, communication performance is unstable due to the influence of the Doppler shift when a communication equipment is moving.

We have studied a method of signal processing in the communication system to realize the Doppler shift resistance. We proposed the Doppler RAKE reception that concurrently processes multiple resampling in OFDM system and provides stable communication even in the situation where the transmitter moves irregularly. The effectiveness of the proposed method is verified by computer simulation, pool test and sea area test.

研究分野：無線通信

キーワード：水中音響通信 ドップラーシフト OFDM リサンプリング

1. 研究開始当初の背景

我が国の海域には膨大な海洋エネルギー資源や鉱物資源が存在することが知られており、その有効利用に注目が集まっていることや、漁業生産高が40年前にピークに達した後、年々減少傾向にあり、水産資源管理の重要性が高まっていることから、海洋探査や調査をより効率的に行うために海洋調査・探査機器のさらなる開発が求められている。海洋調査・探査機器で注目を集めているのはAUV(自律型無人探査機)やROV(遠隔操作探査機)であり、機械による資源の発掘やセンサによる測定、カメラによる情報収集など、ダイバーが作業困難な深海や危険性の高い場所で活躍する。AUVやROVの遠隔操作や情報収集には通信手段が必須であるが、有線伝送は通信ケーブルのコストや重量、断線などの欠点があり、無線伝送に対するニーズは高い。水中では電磁波や光は大きく減衰するため、通信範囲1kmを超える遠距離では音波を送受する水中音響通信が用いられる。

水中音響通信を不安定とさせる要因としてドップラーシフトがある。通信装置を搭載した船舶や水中探査機が移動する時にドップラーシフトが発生し、送信機で送波したものと中心周波数が異なる信号が受信機で観測される。一般的な水中音響通信の周波数帯は20kHz~60kHzであり、周波数シフト量と中心周波数との比が小さいことからドップラーシフトの影響を受けやすいことが知られている。水中音響通信では受信信号がドップラーシフトの影響を受けたときに送信時と受信時の信号周波数ずれが発生し、受信側での復調が困難となり、通信不能となる場合が多い。

2. 研究の目的

通信装置移動時の水中音響通信ではドップラーシフトの影響を低減する補償処理が不可欠であり、補償処理としてはリサンプリング処理や周波数同期が知られている。従来研究の手法では通信フレームの先頭に既知データ(プリアンブル)を埋め込んでおくことで受信機側に周波数シフト量を検出し、通信フレーム全体の信号に対して検出した周波数シフト量に基づくリサンプリングや位相回転補償を行う。ただし、これら手法はドップラーシフト量が一定であることが前提であり、通信装置が不規則に移動したときに発生する非正常ドップラーシフトには不十分である。本研究では非正常ドップラーシフトに対応した補償処理について取り組む。

3. 研究の方法

- (1) 通信装置が不規則に移動する状況に対応するドップラーシフト補償処理手法を検討し、計算機シミュレーションで評価する。
- (2) 水中音響通信装置の構築および実海域での実証試験を行い、提案法の有効性を検証する。

4. 研究成果

最近の水中音響通信では周波数利用効率が高く、音波反射による遅延波干渉(マルチパス)に強い直交周波数分割多重方式(OFDM)が利用されている。OFDMはマルチパスに対して強いが、ドップラーシフトが発生しているときはスペクトラムが隣接する信号どうしが干渉し、OFDMの復調精度が劣化する問題がある。従来のドップラーシフト補償ではドップラーシフト量に応じて受信信号を時間伸縮させて元の信号に戻すリサンプリングによる補償処理を行うが、ドップラーシフトばらつきや時間変動の影響を受けて補償性能が低下する問題があった。

リサンプリング処理の手順を図1に示す。ある一定間隔でサンプリングされた送信側デジタル信号をデジタル・アナログ変換し、連続信号とする。周波数下がるドップラーシフトが発生したとき、時間軸上で信号全体が伸長され、図中の三角で示すようにサンプリング点が等価的にずれる。送信側と受信側のサンプリング間隔が一致しているとき、デジタル・アナログ変換して得られる受信側のデジタル信号は四角で示すサンプリング点であり、送信側と比べて信号点数が増えている。送信側のデジタル信号点数と合わせるようにデジタル補間すると元の信号に復元することができる。この補間をリサンプリング処理と呼ぶ。

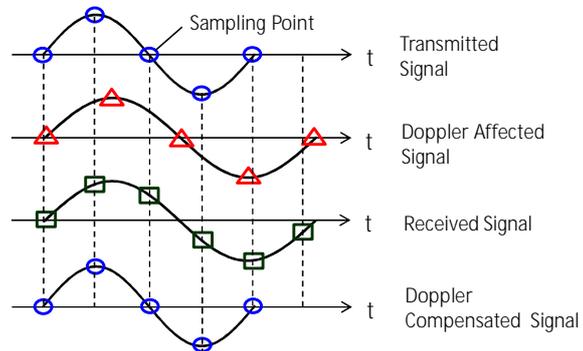


図1 リサンプリング処理

ドップラーシフトばらつきがある場合のリサンプリングレートと OFDM 方式通信性能の関係を検討した。OFDM ブロックを 3 つの区間に分割し、 $-$ 、 0 、 $+$ のドップラーシフトパターンをランダムに入れ替える。このときのブロック全体に対するドップラーシフト平均は 0 であるので、従来法での最適リサンプリングレートは 1 であり、リサンプリングを実行しない場合と同義である。QPSK-OFDM 方式のシミュレーションを行う。OFDM サブキャリア数 512、伝送帯域 $40 \sim 60$ kHz、キャリア中心周波数 50 kHz、サンプリング周波数 200 kHz、畳み込み符号の符号化率を $3/4$ とした。OFDM ブロックは 10 倍オーバーサンプリングを適用し、ブロックを 3 分割できるようにブロック全体に対して $1/100$ 程度の CP を付加し、ブロック長を 5160 サンプルとした。また、伝搬路はドップラーシフト量 $=4 \times 10^{-4}$ とし、CN 比 30 dB となるようにガウス雑音を付加する。

表 1 にドップラーシフトパターンとリサンプリングレートに対するビット誤り率 (BER) 結果を示す。どのドップラーシフト平均も 0 であるが、BER が最小となる最適リサンプリングレートが異なる結果となった。ドップラーシフトにばらつきがある場合はシフト量平均に対応したリサンプリングレートで固定するのではなく、リサンプリングレート範囲を広げたほうが良いことがわかる。

表1 リサンプリングレートに対するBER結果

Doppler Shift Patterns			Resampling Ratio				
A	B	C	$1-\Delta$	$1-\Delta/2$	1	$1+\Delta/2$	$1+\Delta$
$-\Delta$	0	Δ	0.48	0.38	0.03	0.27	0.52
$-\Delta$	Δ	0	0.52	0.54	0.19	0	0.44
0	$-\Delta$	Δ	0.56	0.49	0.02	0	0.44
0	Δ	$-\Delta$	0.50	0.50	0.42	0.28	0.47
Δ	$-\Delta$	0	0.49	0.52	0.51	0.35	0
Δ	0	$-\Delta$	0.51	0.47	0.32	0	0.37

複数リサンプリング処理を用いたドップラーシフト補償 (Parallel Resampling) を図 2 に示す。送信側では OFDM 信号にドップラーシフト推定用の正弦波信号を重畳して送信信号とする。受信側ではフィルタ処理により正弦波信号と OFDM 信号を分離する。正弦波信号に対して周波数測定を行い、ドップラーシフト平均 M と偏差 D を求める。

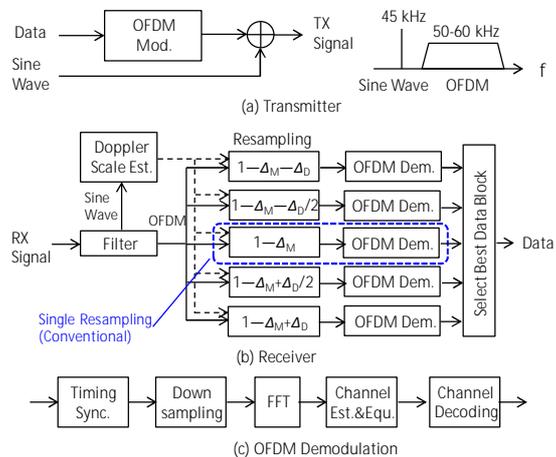


図2 並列リサンプリング処理

従来手法のリサンプリングは図中の Single Resampling と示す範囲であり、ドップラーシフト平均 M のみを用いる。Table 2 で示すようなドップラーシフトばらつきがある場合には対応できない。一方、複数リサンプリング処理はリサンプリングレートを、 $1-M-D$ 、 $1-M-D/2$ 、 $1-M$ 、 $1-M+D/2$ 、 $1-M+D$ のように複数設定して、それぞれ別に OFDM 復調処理を行う。リサンプリングレート毎にそれぞれ復号データが得られるが、そのデータ候補からビット誤りがないものを選択し、最終出力とする。OFDM 復調はタイミング同期、FFT、チャネル推定・等化、誤り訂正復号の順で行う。誤り訂正復号と同時に巡回冗長検査 (Cyclic Redundancy Check, CRC) による誤り検出を行うことで復号データに誤りがあるかどうかを判別する。

石垣市周辺海域において海域試験を実施した。海域水深は 20 m、受波器は海面から 10 m の位置で固定し、送波器は海面から 1 m の位置に設置し、船で牽引する。送受波器位置を GPS で記録した様子を図 3 に示す。Test 1 は $5.5 \sim 7$ km/h、Test 2 は $7 \sim 9$ km/h の速度で送波器を往復移動させた。通信方式は QPSK-OFDM 方式を用いる。通信安定性を高めるために OFDM サブキャリアに対する周波数拡散を適用する。Test 1 は拡散率 1 (適用なし)、Test 2 は拡散率 2 であり、送信時伝送レートはそれぞれ、4 kbps、2 kbps である。

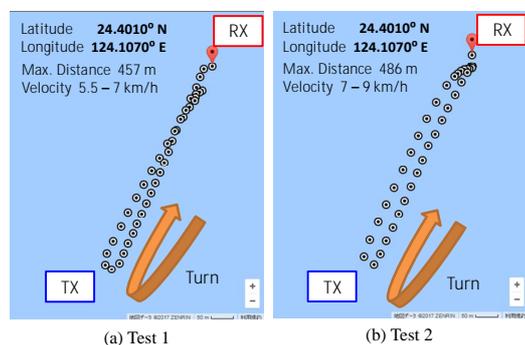


図3 送受波器位置

従来法と提案法を BER で評価した結果を図 4 に示す。計測した CN 比は $10 \sim 30$ dB であった。提案法 (Parallel Resampling) は従来法 (Single Resampling) よりも低い BER を達成し、多くのフレームでビット誤りが 0 となる状況にまで改善していることがわかる。なお、リサンプリングを行わない場合 (Non-Resampling) は多くの場合で BER が 0.5 と全く通信できない。

フレーム誤り率(Frame Error Rate、FER)をビット誤りがあるフレーム数と全フレーム数との比で定義する。Test 1のFERは従来法で0.59、提案法で0.27とフレーム誤りを半分に減らした。Test 2は周波数拡散によりTest 1よりBERが全体的に小さい。Test 2のFERは従来法で0.30、提案法で0.02であり、提案法と拡散率2の周波数拡散を併用すればほぼ誤りなく通信できることが確認できた。

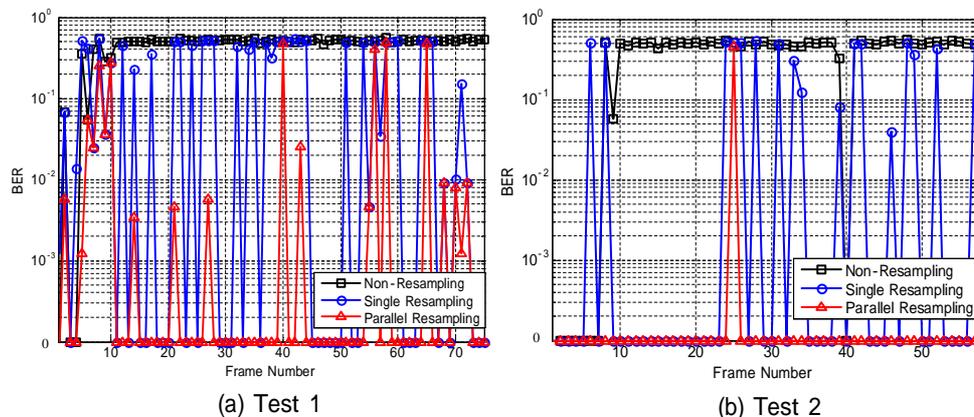


図4 実海域試験のBER結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

Shingo Yoshizawa, Takashi Saito, Yusaku Mabuchi, Tomoya Tsukui, Shinichi Sawada, "Parallel Resampling of OFDM Signals for Fluctuating Doppler Shifts in Underwater Acoustic Communication," Journal of Electrical and Computer Engineering, Volume 2018, Volume 2018, Article ID 3579619, 11 pages, Nov. 2018.

〔学会発表〕(計 5 件)

麦倉誠一, 吉澤真吾, 新甫友昂, 津久井智也, 齋藤 隆, "水中音響通信リサンプリング処理における計算量削減方法の検討," 電子情報通信学会 SIS 研究会, SIS2018-23, pp.13-16, Dec. 2018.

Shingo Yoshizawa, Takashi Saito, Yusaku Mabuchi, Tomoya Tsukui, Shinichi Sawada, "Variable Range Resampling for Computationally Efficient Doppler Compensation in Underwater Acoustic Communication," MTS/IEEE OCEANS - Kobe, 4 pages, May 2018.

Shingo Yoshizawa, Hiroshi Tanimoto, Takashi Saito, Yusaku Mabuchi, Tomoya Tsukui, Shinichi Sawada, "Parallel Resampling Receiver for Underwater Acoustic Communication with Non-uniform Doppler Shifts," MTS/IEEE OCEANS - Anchorage, 4 pages, Sep. 2017.

吉澤真吾, 谷本 洋, 齋藤 隆, 馬淵 佑作, 津久井 智也, 澤田 信一, "データ選択型 Rake 受信を用いた水中音響通信の実海域試験評価," 電子情報通信学会 US 研究会, US2017-53, pp.37-40, Aug. 2017.

吉澤真吾, 谷本 洋, 齋藤 隆, 馬淵 佑作, 津久井 智也, 澤田 信一, "水中音響通信におけるリサンプリング処理を用いたドップラーシフト補償の効果," 海洋音響学会 2017 年度研究発表会講演論文集, pp.21-24, May 2017.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕
出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕
ホームページ等

<http://islab.elec.kitami-it.ac.jp/>

6 . 研究組織

(1)研究分担者

無し

(2)研究協力者

研究協力者氏名：麦倉 誠一

ローマ字氏名：(MUGIKURA Seiichi)

研究協力者氏名：坂本 舜

ローマ字氏名：(SAKMOTO Shun)

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。