

令和 3 年 6 月 17 日現在

機関番号：82706

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2020

課題番号：18K13946

研究課題名（和文）非定常ドップラーシフトを伴うマルチパス環境下での水中音響通信の研究

研究課題名（英文）Underwater acoustic communication in a multipath environment with the nonuniform Doppler shift

研究代表者

出口 充康（Deguchi, Mitsuyasu）

国立研究開発法人海洋研究開発機構・研究プラットフォーム運用開発部門・技術主任

研究者番号：50725645

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：特有の課題を有する水中音響通信の分野でも、高速、あるいはロバストな通信の需要が高まってきている。くわえて、小型船舶と水中無人機との通信のように、移動体端末間での通信への期待も高まりつつある。このような高速、あるいはロバストな移動体通信を実現するには、非定常ドップラーシフトへの対応が不可欠である。本研究では、直接波、およびマルチパス波の非定常ドップラーシフトに対して有効な新規手法を提案し、シミュレーション、および実海域試験でその効果を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、実運用に沿った環境下で非定常ドップラーシフトが通信に与える影響を評価し、さらに、その影響を抑制する手法を提案するとともに、シミュレーションと実験を用いてその動作を確認した点に学術的意義がある。また、小型船舶や水中無人機といった移動体間での音響通信に資する技術であることから、既存の海洋開発におけるIoT化に資するとともに、水中音響通信の確立に必要な条件の緩和に有効な技術であるため、海洋開発への新規参入を容易とする点に社会的意義がある。

研究成果の概要（英文）：In the field of underwater acoustic communication of which a channel has specific challenges, demands of high data-rate or robust communication have been growing. In addition, expectations are rising for communication between mobile terminals, such as a small surface vessel and an unmanned underwater vehicle. In order to establish high data-rate or robust communication between mobile terminals, effects of the nonuniform Doppler shifts must be sufficiently suppressed. In this study, new processing against the nonuniform Doppler shifts of direct and multipath signals was proposed. Furthermore, through simulation and an at-sea experiment, it was confirmed that the processing effectively works.

研究分野：工学

キーワード：水中音響通信 マルチパス ドップラーシフト 信号処理 判定帰還型等化器 時間変動 非定常

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、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

一般に空中での通信には電波が用いられるが、導電性のある海水中では電波が伝搬しないことから、水中音響通信は海洋観測において必要不可欠な技術である。しかし、水中音響通信は空中電波通信と比べ、伝搬速度が5桁低いためドップラーシフトが桁違いに大きい、高強度の反射波や屈折波(マルチパス波)が数多く長い時間にわたって受信される(遅延広がりが大きい)といった問題があり、特に移動体通信に対し、以下のような深刻な課題を与える。

- (1) 信号の受信中に送信位置、受信位置が変化する事で、チャンネル応答が非定常に変化する。
- (2) ドップラーシフトがマルチパス波ごとに異なる。ドップラーシフトは、送波器、受波器が移動する方向に対する音波の伝搬角度に依存するため、その値は、マルチパス波ごとに異なることになる。
- (3) ドップラーシフトが非定常になる。ピークルの動揺や海面波の変動によって、それぞれのパスを通った信号のドップラーシフトが非定常に変化する。

特に(1)(3)については、非定常な変化を定常とみなすことができるように信号期間を極端に短くする、などの対策が考えられるが、それに伴ってデータレート的大幅な低減が生じてしまう。また、(2)に関しては、パスの分離が不可欠となり困難を極める。

例えば空中電波通信で広く用いられている直交周波数分割多重(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)を考える場合、周波数軸上に一定間隔でデータシンボル(送信データ)を配置するため、時間軸上での非定常な変化による影響が大きく、そのような時間的変動は、FFT演算の直交性の破綻を通じてデータシンボル間の干渉(Inter Carrier Interference: ICI)を引き起こす。また、パスごとに異なるドップラーシフトの影響を受けていることから、定常であったとしてもICIが生じる。周波数軸上のデータシンボル間隔を広げる事で影響を軽減する事も可能だが、その場合には、データレートが低下する事となる。

一方、近年、水中音響通信に対して、高いデータレートと、小型船舶等での運用の2点の期待が高まってきている。海水の物理的特性のために使用帯域幅が狭い水中音響通信において、高いデータレートを達成するためには、極力データレートを下げない通信方式を選択し、かつ高い復調性能を達成する必要がある。また、小型船舶の動揺は大型船舶と比較して非常に早く、かつ大きくなる事が広く知られている。したがって、遅延が大きく振幅も大きいマルチパス波が存在する水中音響通信特有の通信路において、非定常ドップラーシフト環境下で、可能な限りデータレートを低下させずに高い復調性能を達成する事が必要である。

2. 研究の目的

前述の物理的な課題は、通信工学の観点でまとめると

- (1) チャンネル応答(直接波、マルチパス波含む)の非定常な時間的変化、
 - (2) パスごとに異なるドップラーシフトへの対応
- の二点に集約される。

そこで本研究では、できる限りデータレートを低下させないという観点から、単一搬送波変調(Single Carrier Modulation, SCM)に着目して、上記の二点の課題に起因する復調性能の劣化を評価する。評価にあたっては、小型船舶への運用の可能性を踏まえて、図1に示すような垂直配置での通信路を仮定する。想定される通信においては、海面付近の受波器が運動し、海中にある送波器は位置が変化しないものとする。この状況は小型船舶による作業型水中無人探査機、あるいは固定センサーの運用状況を意識した想定となっている。

続けて、影響評価の結果を踏まえた上で、直接波とマルチパス波を含むチャンネル応答の時間変化、ならびにパスごとに異なるドップラーシフトへの対応を検討し、必要に応じて新規手法を考案する。その結果を、最終的には実海域試験を通じて確認する事で、実現可能性を確認する。

3. 研究の方法

- (1) 非定常ドップラーシフトによる復調性能への影響評価

非定常ドップラーシフトの復調性能への影響を評価するには、取り扱うべきドップラーシフトを正確に把握していなければならないため、シミュレーションを用いて影響を評価した。シミュレーションの想定配置を図2に示す。ここで、受波器は周期を T_r 、最大角を θ_{max} 、運動の初期位相を ψ_b として、ロール角 $\theta_r(t) = \theta_{max} \sin(2\pi t/T_r + \psi_b)$ の調和振動をしているものと仮定した。

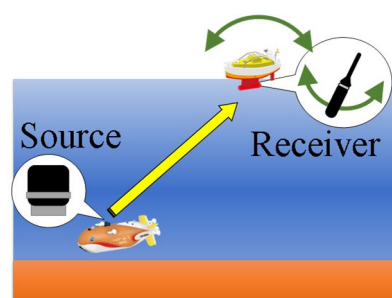


図1 本研究で想定される水中音響通信環境

加えて、マルチパス波は海面反射波 1 波のみとした。シミュレーションで用いたパラメータを表 1 に示す。

なお、伝搬シミュレーションは ray theory にもとづいて各離散時間でパスごとに伝搬時間を計算し、最終的に得られた各パスの信号を加算することで受信信号を計算した。また、ノイズは含めないものとし、海面も変化がなく、平坦であるものとして扱った。くわえて、復調性能を評価するにあたっては、output SNR を用いた。同一のロール周期で受信される場合であっても、受信されるタイミングに応じて、受信信号に与えられる非定常ドップラースhiftが異なる。そのため、初期位相 ψ_b を 0-360° の範囲で 5° ごとに変化させ、得られた output SNR の最頻値を評価する事で、各運動状態の復調性能を評価した。

従来 SCM の復調に用いられてきた判定帰還型等化器 (Decision Feedback Equalizer、以下 DFE) は、チャンネル応答推定の更新レートが通信のシンボルレートに等しい。そのため、チャンネル応答の時間変化に対する追従性能は、シンボルレートに比例している。したがって、様々なシンボルレートについてシミュレーションを実施し、非定常ドップラースhiftの影響におけるシンボルレート依存性についても評価した。

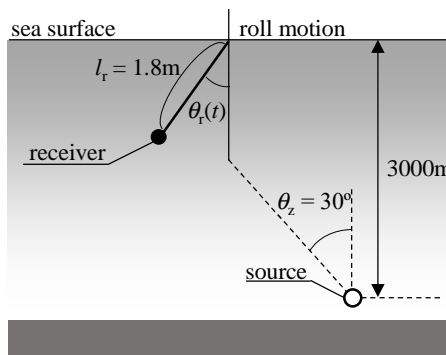


図 2 非定常ドップラースhiftの影響評価における想定環境

表 1 シミュレーションパラメータ

パラメータ	値
サンプリング周波数	400 kHz
音速	1500 m/s (一定)
直接波振幅	1
マルチパス波振幅	0 または -0.3
ロール周期	1 s から 10 s (刻み幅 1 s)
ロール角 $\theta_r(t)$ 最大値	2° から 20° (刻み幅 2°)
直接波から見たマルチパス波の到達遅延時間	約 2 ms ($\theta_r(t)$ に応じて変化)

(2) 非定常ドップラースhiftによる影響抑制手法の考案および効果

非定常ドップラースhiftによる影響抑制手法に関しては、

直接波による影響の抑制

マルチパス波による影響の抑制

に分け、それぞれについて新規手法を考案した。また、それぞれの新規手法の抑制効果の評価は前述の影響評価で用いたシミュレーションと同様のシミュレーションで評価を行った。

(3) 実海域試験での新規手法の評価

前述の新規手法について、その実用性を確かめるため、実海域試験で得られたデータに適用した。実験では、数m程度の小型船舶を用い、水深 1720m 地点に係留した送波器から通信信号を発信し、船舶に取り付けた受波器にて受信信号を収録した。

比較のため、通常的手法、直接波の非定常ドップラースhiftの影響抑制手法、マルチパス波の非定常ドップラースhiftの影響抑制手法をそれぞれ適用し、それらを比較することで各手法の効果を評価した。

表 2 実験パラメータ

パラメータ	値
搬送波周波数	20 kHz
帯域幅	8kHz
ロールオフ率	0.15
受波素子数	5

4. 研究成果

(1) 非正常ドップラーシフトによる復調性能への影響評価

第一に、マルチパス波が受信されない場合について、その影響を評価した。図3は、ロール角最大値に応じた、ロール周期とシンボルレートに対する output SNR の最頻値のカラプロットである。図3から、大きく分けて2点の事がわかる。一つは、ロール角が大きい、またはロール周期が短い場合に復調性能が低い事である。この復調性能が低下する際の運動条件の特徴は、信号を受信している期間にロール角が大きく変動する条件を意味しており、非正常ドップラーシフトが復調性能に大きく影響を与えている事の証左である。図3が示すもう1点の特徴は、シンボルレートが高い時、復調性能が高まっていることである。この特徴は、シンボルレートがチャネル応答推定の更新レートと等しい事から、シンボルレートが高い時、従来手法であっても、非正常ドップラーシフトによる影響を一定水準で補正できていることを示している。

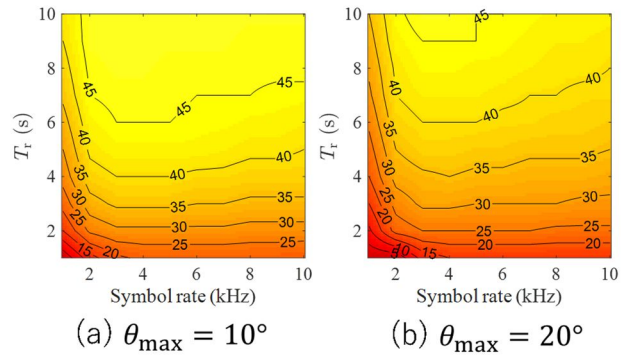


図3 マルチパス波が受信されない条件下での、output SNR の運動パラメータおよびシンボルレート依存性

続いて、マルチパス波が一波受信される場合についての評価結果を図4に示す。図3で示されたロール周期およびシンボルレートへの依存性、ならびにロール角最大値への依存性が図4でも共通して確認できるものの、図3と比較して、著しく復調性能が劣化している事がわかる。これは、従来手法では、直接波の非正常ドップラーシフトの影響に比べて、マルチパス波の非正常ドップラーシフトの影響の方が、より抑制が難しい事を意味している。

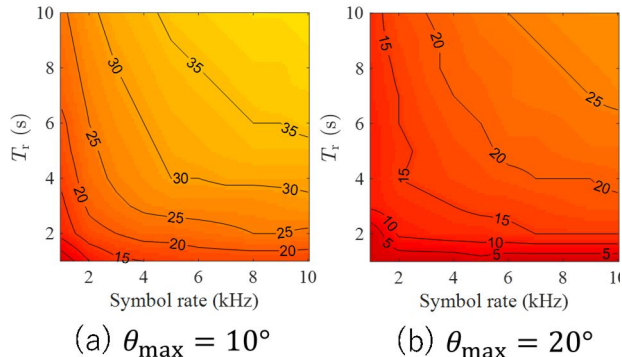


図4 マルチパス波が1波受信される条件下での、output SNR の運動パラメータおよびシンボルレート依存性

(2) 非正常ドップラーシフトによる影響抑制手法の考案および効果

第一に、直接波の非正常ドップラーシフトの影響を抑制する目的で、適応デジタルダウンコンバージョン(Adaptive Digital Down-conversion, 以下 ADDC)をあらたに考案した。ADDAC と従来手法の DFE を組み合わせた、ADDAC-DFE のブロック図を図5に示す。従来用いられてきた DFE は、フィードフォワードフィルタ、フィードバックフィルタ、デジタル位相ロックループ (Digital phase lock loop, 以下 DPLL) で構成されており、フィードフォワードフィルタおよび DPLL によって直接波のチャネル応答とその位相変化を、フィードバックフィルタによってマルチパス波の影響を推定し、補正している。特に直接波のチャネル応答の時間変化に着目すると、受信タイミングの変化、位相変化の2点があるが、それらのうち、位相変化に関しては DFE 内のフィードフォワードフィルタおよび DPLL において補正される。しかしながら伝搬時間の変化が位相変化を引き起こすと考えると、必然的

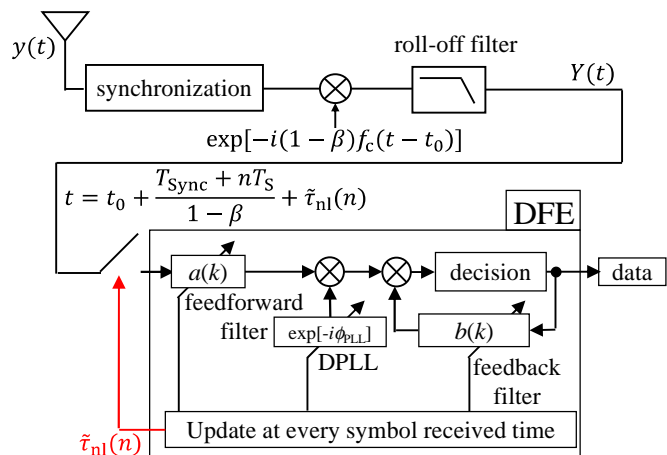


図5 ADDAC-DFE ブロック図

に 受信タイミングの変化も生じていることとなる。そこで、本研究では、DFE で推定した直接波の位相変化から、データシンボルごとに受信タイミングの変化を計算し、デジタルダウンコンバージョンにおいて補正する、ADDC を考案した。これにより、適応的な受信タイミング補正が可能となる。

さらに、本研究ではシミュレーションを通じて ADDC-DFE の動作を確認するとともに、それによる復調性能の改善を評価した。図6は従来手法である DFE と ADDC-DFE を用いて得られた output SNR の最頻値をカラープロットしたものである。

図6が示すように、シンボルレートが 1kHz の時、復調性能の改善は見られなかった。これは、DFE によるチャネル応答推定の更新レートが十分でなく、本来 DFE が推定し、補正する位相変化に対して追従できていなかったことに起因する。

一方、シンボルレートが 5kHz の結果では、特定の運動条件下において復調性能の改善が見られた。これは、ADDC が正常に動作し、受信タイミングが補正されたためと考えられる。

改善が見られなかった範囲に着目すると、主として従来の DFE でも非常に高い output SNR が得られている場合と、従来の DFE で著しく低い output SNR しか得られない場合であった。前者に関しては、これらの運動条件下において位相変化、および受信タイミングの変化が緩やかで従来の DFE であっても時間変動に追従できたためであり、後者に関しては、1kHz のシンボルレートの結果の場合と同様、非常に早い位相変化に対して DFE による推定が十分に追従できなかったためと考えられる。

第二に、マルチパス波の非定常ドップラーシフトによる影響抑制手法についてであるが、考案した新規手法をシミュレーションで評価した結果、一定の運動条件下において、従来の DFE による復調性能に対して、改善効果が確かめられた。

(3) 実海域試験での新規手法の評価

実海域試験で収録した音響通信信号に対して、現在、評価を進めている。その一例として、ある受信信号に対し、従来の DFE、ADDC-DFE、マルチパス波のドップラーシフトの影響抑制に関する新規手法(以下 new processing)、ADDC-DFE と new processing を組み合わせた処理の4種の復調処理を適用した結果を表3に示す。この時、input SNR は5チャンネル平均で 13.05dB だった。

表 3 各復調手法における output SNR

Conventional DFE	ADDC-DFE	New processing	ADDC-DFE + new processing
11.39 dB	13.46 dB	12.71 dB	14.22dB

表3が示す通り、従来の DFE の復調性能が最も低く、ADDC-DFE と new processing を組み合わせた処理の復調性能が最も高かった。このことから、得られた受信信号は、直接波の非定常ドップラーシフトとマルチパス波のドップラーシフトの双方の影響を受けて復調性能が劣化しており、それぞれ本研究で考案された手法が有効であったことがわかる。実験信号での処理は未だ完了しておらず、現時点ではシミュレーション同様、実環境においても提案手法が有効である事を確かめたのみである。今後は、シミュレーション結果との類似点、相違点等を調査するとともに、DFE 内部の処理結果を詳細に解析する事で、より正確に提案手法の動作を把握する予定である。また、Input SNR のより高いデータを調べることにより、直接波、マルチパス波のドップラーシフトの影響の程度と、考案した新規手法の動作について、より詳細な解析が可能であると考えており、より実用性の高い処理となるよう改善していく予定である。

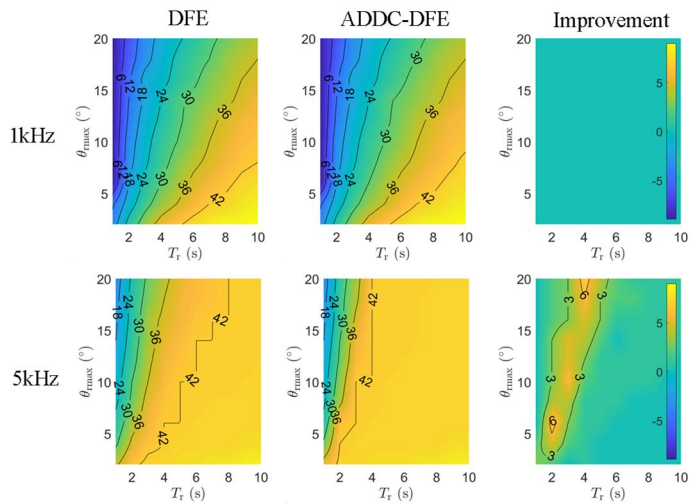


図6 従来のDFE、およびADDC-DFEで得られたOutput SNRと、ADDC-DFEによる改善量。上図はシンボルレート1kHz時の結果であり、下図はシンボルレート5kHz時の結果を示している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Deguchi Mitsuyasu, Kida Yukihiro, Watanabe Yoshitaka, Shimura Takuya	4. 巻 58
2. 論文標題 Dependence of demodulation performance on symbol rate for underwater acoustic communication with nonuniform Doppler shift	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SGGF02 ~ SGGF02
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/1347-4065/ab0ad7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Deguchi Mitsuyasu, Kida Yukihiro, Watanabe Yoshitaka, Shimura Takuya	4. 巻 59
2. 論文標題 Application of adaptive digital down-conversion to underwater acoustic communication with nonuniform Doppler shift	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SKKF02 ~ SKKF02
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ab80db	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 2件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 出口 充康, 樹田 行弘, 渡邊 佳孝, 志村 拓也
2. 発表標題 水中音響通信におけるドップラーシフト環境下のマルチパス波による影響のシンボルレート依存性
3. 学会等名 海洋音響学会2019年度研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Mitsuyasu Deguchi, Yukihiro Kida, Takuya Shimura
2. 発表標題 Effects of multipath signal with the nonuniform Doppler shift on vertical underwater acoustic communication
3. 学会等名 The 5th underwater acoustics conference and exhibition UACE2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Mitsuyasu Deguchi, Yukihiro Kida, Takuya Shimura
2. 発表標題 Adaptive symbol time adjustment for underwater acoustic communication with nonuniform Doppler shift
3. 学会等名 The 40th Symposium on Ultrasonic Electronics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Mitsuyasu Deguchi, Yukihiro Kida, Yoshitaka Watanabe, and Takuya Shimura
2. 発表標題 Dependence of Demodulation Performance on Symbol Rate for Underwater Acoustic Communication with Nonuniform Doppler Shift
3. 学会等名 The 39th Symposium on UltraSonic Electronics
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 出口 充康, 樹田 行弘, 志村 拓也
2. 発表標題 水中音響通信における適応デジタルダウンコンバージョン
3. 学会等名 電子情報通信学会無線通信システム研究会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------