

[招待講演] 高耐性を有する水中音響通信 デジタル変復調方式の基礎検討

2023年11月27日

電子情報通信学会 第10回 水中無線技術研究会 (UWT)

吉澤 真吾 (北見工業大学)

水中音響通信・測位に関する研究歴

2014-2016

ガードインターバル越え長遅延波に対する
水中音響通信の改良(OFDM & RAKE受信)

電気通信普及財団研究助成

2013年以前はOFDM, MIMO-OFDM方式無線通信
方式(陸上無線)およびハードウェア開発に従事

2016-2019

非定常ドップラーシフトに対応した水中音響
通信(OFDM & リサンプリング処理)

科研費 若手研究(B)

2019-2023

レトロディレクティブ方式ビームフォーミング
による水中音響通信の通信特性改善
(MISO-OFDM)

科研費 基盤研究(C)

2018-2023 (現在)

周囲騒音・音波反射・ドップラーシフトに頑健
な水中音響測位方式
(相互相関関数による到達時間・時間差測定)

2022-2023 (現在)

高耐性を有する水中音響通信デジタル
変復調方式 (SSMS)

「高耐性を有する水中音響通信デジタル
変復調方式の研究」

防衛装備庁安全保障技術研究推進制度 (タイプC)
2023～2025年度

高耐性を有する水中音響通信デジタル変復調方式の研究

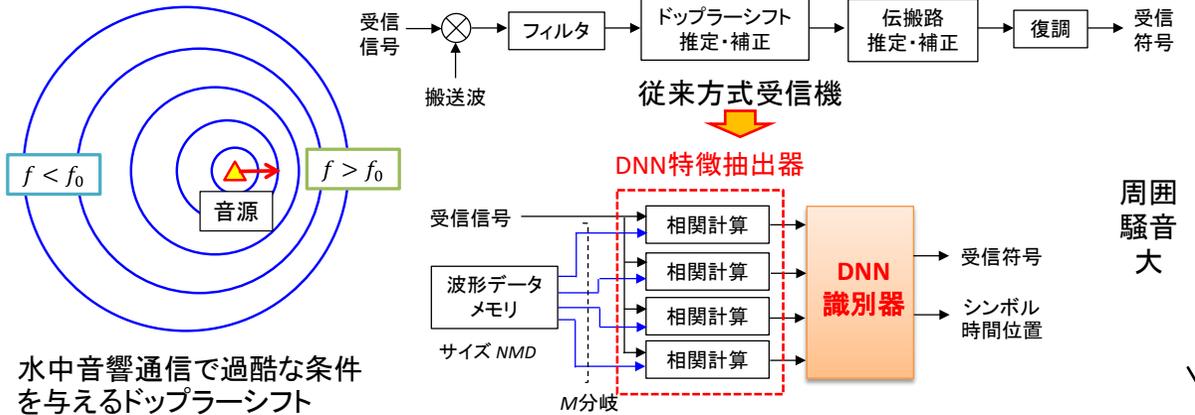
国立大学法人北海道国立大学機構 北見工業大学、吉澤真吾

研究の概要

水中音響通信にとって過酷な条件を克服する通信技術を確認するため、新発想のデジタル変復調※1方式とディープラーニング※2を利用した新方式の受信機について検討し、従来の通信方式との比較検討及び水槽実験により有効性を実証する。

※1 変復調: データを伝送する際に送信側で最適な電気信号に変換し、受信側で電気信号からデータを復元すること

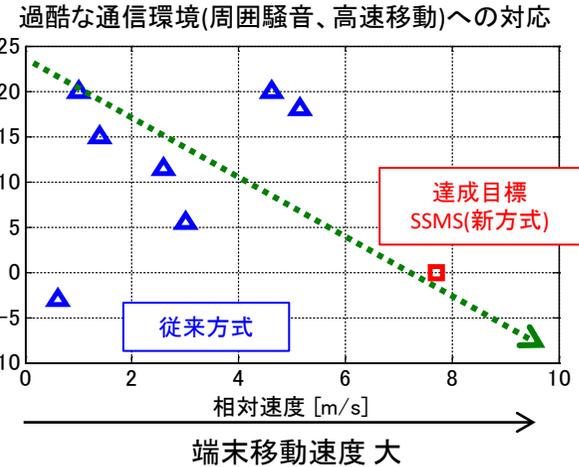
※2 ディープラーニング: 人の脳を模したニューラルネットワークを用いた機械学習の手法の一つ



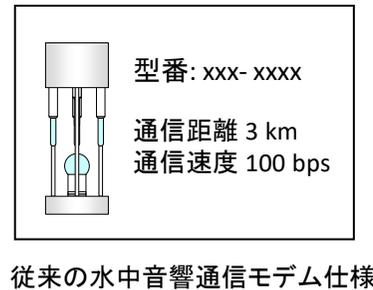
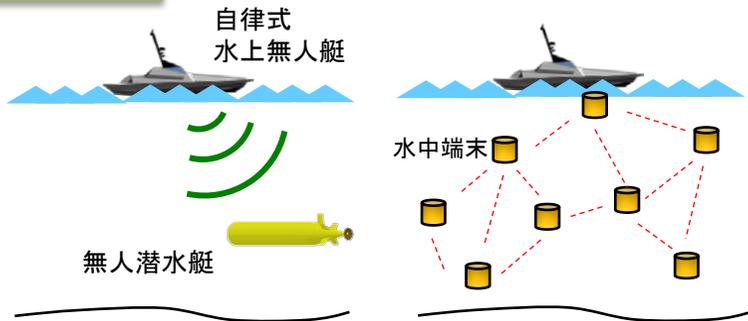
水中音響通信で過酷な条件を与えるドップラーシフト

ディープニューラルネットワーク(DNN)を利用したSSMS*(新方式)受信機

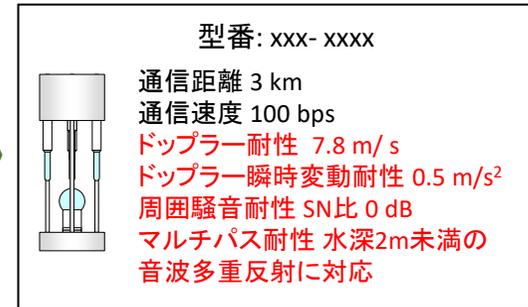
*複数系列を用いた伸縮自在なシンボル(Stretchable Symbols with Multiple Sequences)の略



将来の展望



従来の水中音響通信モデム仕様



将来の水中音響通信モデム仕様

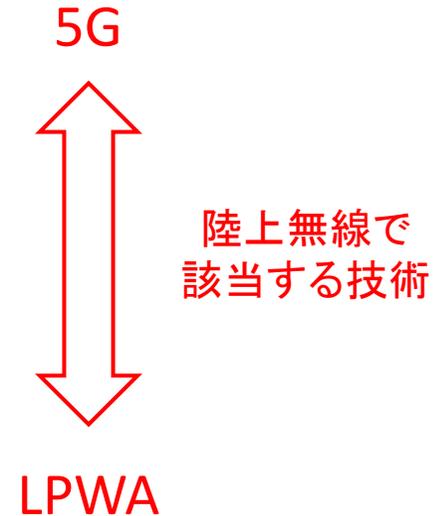
悪天候下で自律式水上無人艇と無人潜水艇が連携して遭難船を探索

水中光通信と音響通信を組み合わせた水中無線ネットワーク

水中音響通信モデム仕様に距離・通信速度だけではなく、様々な通信環境に耐えうる性能を明示

水中音響通信に関する研究動向

- 高速大容量通信
 - 広帯域・MIMO伝送
 - 600 kbps[1], 5 Mbps[2]での伝送試験
- 低SN比通信
 - 長距離伝送
 - 複数M系列によるスペクトラム拡散 (M -ary SS) [3]
 - SN比 -5 dB前後でビット誤り率 10^{-6} 未満
- 高耐性通信(当研究グループ)
 - 様々な妨害要因に対応したロバスト通信
 - 特に低SN比でかつ非定常ドップラーシフト下で安定した通信を目指す
 - 陸上無線技術の延長ではなく、水中音響通信が端緒となる技術確立を目指す



[1] Shimura et al., IEEE UComms, pp.1-4, Aug. 2021.

[2] Fukumoto et al., IEEE Global Oceans 2020: Singapore, pp.1-6, Oct. 2020.

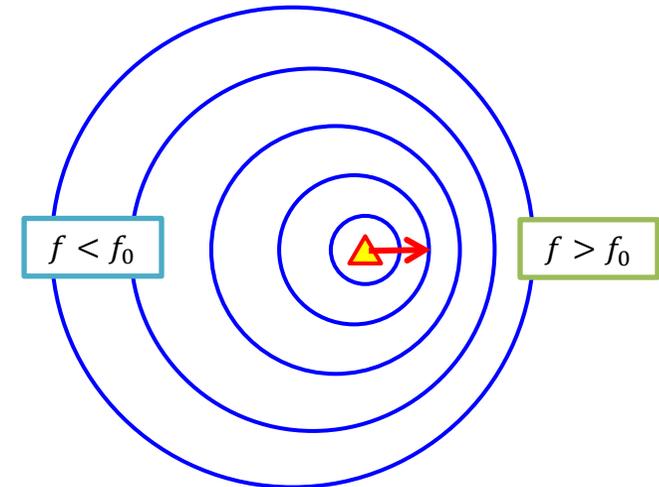
[3] Qu et al., IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol. 43, No. 4, pp.1215-1226, Oct. 2018.

水中音響通信での妨害要因

- 周囲騒音(雑音)
 - 白色ガウス雑音ではない様々な非定常雑音が受信信号に重畳される
 - 波浪、水流、生物雑音、魚探信号
 - 機械・キャビテーション(気泡)雑音 ... 端末移動時では影響大
 - 海域によって背景雑音レベルが大きく変動
- 音波反射 (マルチパス干渉)
 - 海面・海底反射
 - 港湾ではコンクリート側壁からの音波反射が長遅延波をもたらす
- ドップラーシフト・伝搬路変動
 - 音波の速度が遅いため、ドップラーシフト変化量が大
 - 船舶・水中ビークルの揺動や非定常運動(加減速など)に対してドップラーシフト量や伝搬路が瞬時変化する

ドップラーシフト

- ドップラーシフト
 - 波の発生源や観測者が移動することで観測される周波数が変化する現象
- 無線通信
 - 端末が移動した速度に応じて受信機側で周波数シフトを補正



$$f = \left(\frac{c}{c - v_s} \right) f_0 \quad \text{波源が近づくときの周波数シフト量}$$

周波数シフト割合の計算例

宇宙探査船 160,000 km/h – 電磁波通信

波速 [m/s]	端末速度 [m/s]	周波数変化 (シフト率)
3×10^8	4.4×10^4	1.0001 (0.0001)

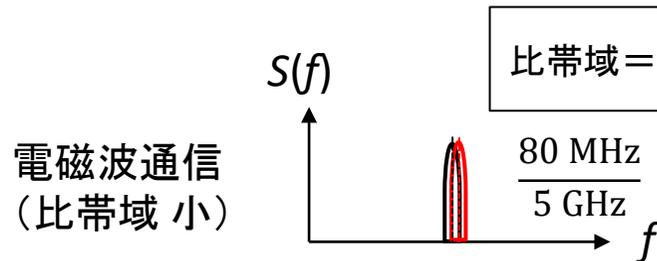
高速船 50 km/h – 音響通信

波速 [m/s]	端末速度 [m/s]	周波数変化 (シフト率)
1500	13.9	1.0094 (0.0094)

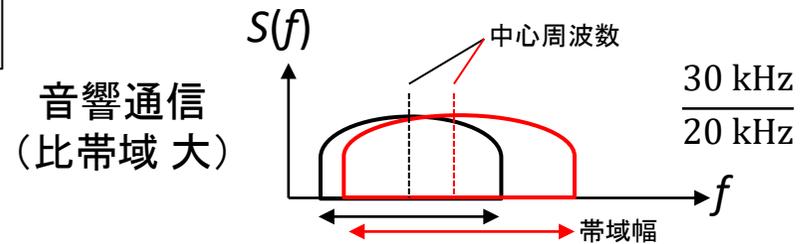
従来のドップラーシフト対策(1)

- 周波数シフト補正 (周波数同期)

- 周波数シフト量を検出し、受信信号の周波数や位相ずれを補正
- 電磁波通信では有効であるが、比帯域が大きい音響通信で補正不可



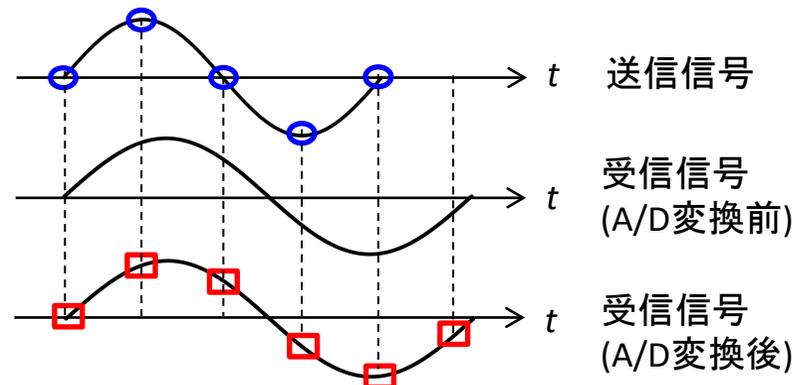
中心周波数位置を元に戻すように補正



比帯域が大きいときは帯域幅も変化するの周波数補正では対応できない

- ドップラーシフトの解釈

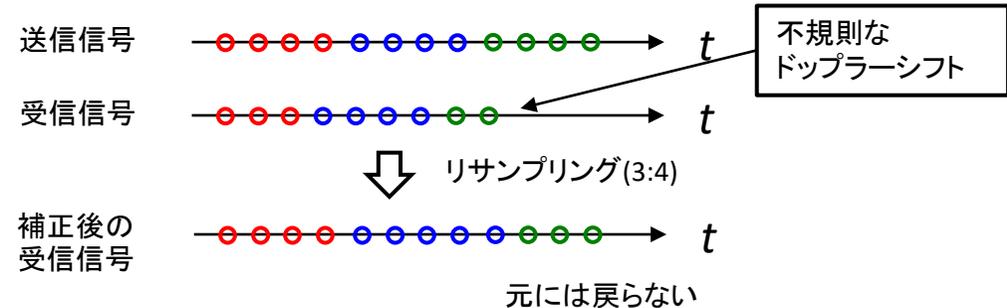
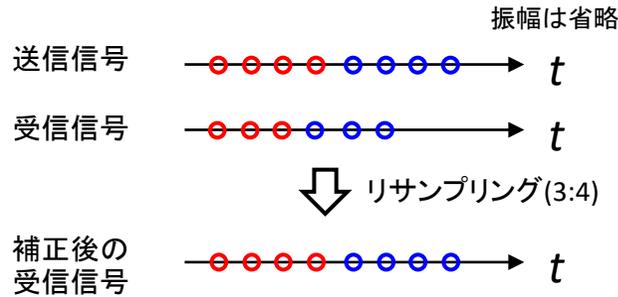
- 信号周波数の低い音響通信では周波数シフトを受信信号の時間伸縮(信号点数の増減)で扱う



従来のドップラーシフト対策(2)

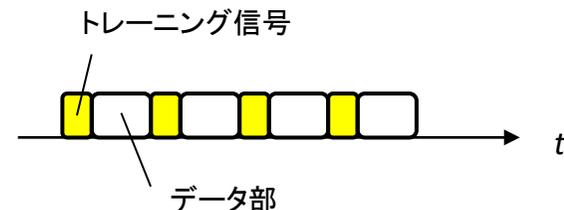
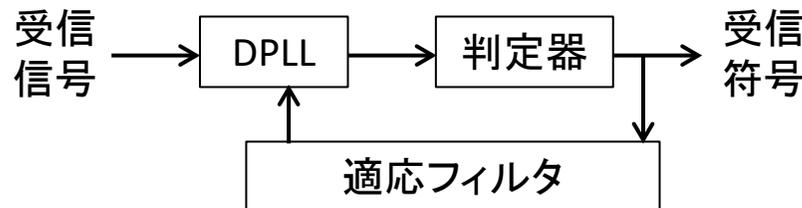
- リサンプリング処理

- 信号点数に元に戻すことで複数の周波数シフトをまとめて補正
- ドップラーシフト量が一定でない場合は補正が不完全



- 逐次タイミング補正(Digital PLLなど)

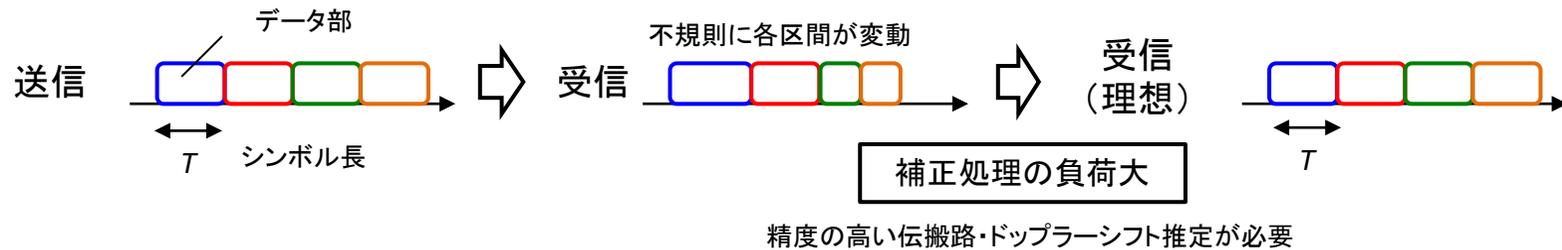
- トレーニング信号を用いてタイミングずれ量を推定して逐次補正
- 受信機構成が複雑で高いSN比(Signal to Noise Ratio)を必要とする



SSMS方式

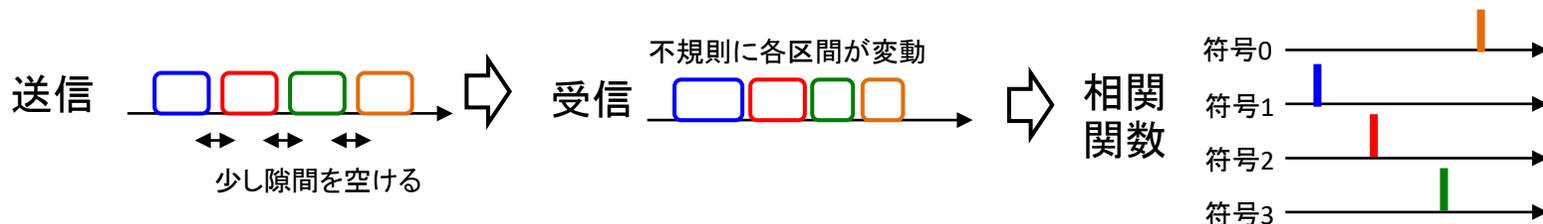
● 従来の考え方

- 受信信号の歪みを補正して送信に近い状態に戻す
- 正確なデータ区切り(シンボル長)に基づいて復調



● SSMS方式*

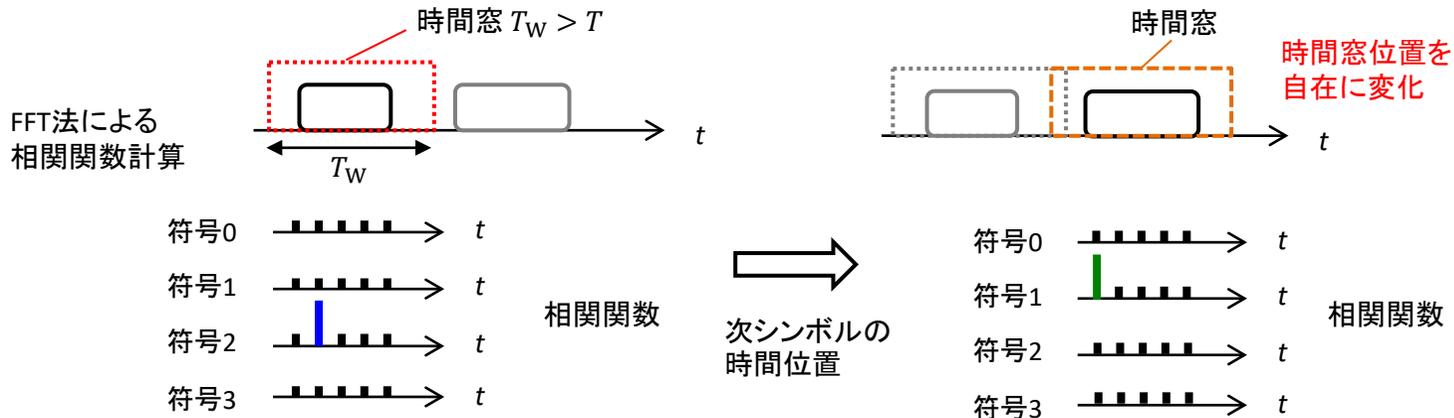
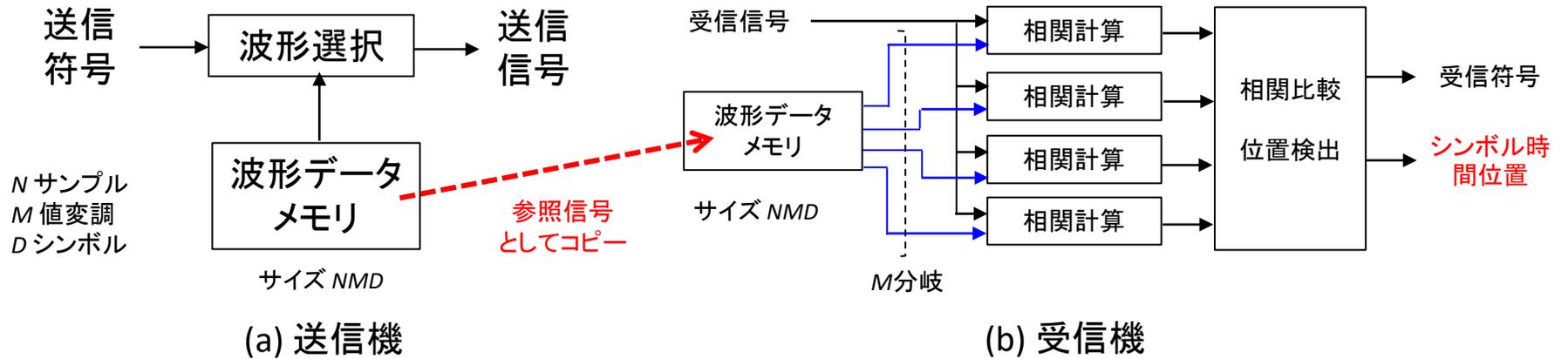
- データ区切り(シンボル長)はドップラーシフトにより不規則とする
- 受信信号を補正せず、パターンマッチング(相関関数)処理で復調
- 劣悪環境(SN比 < 0 dB)でもドップラーシフトに対応可



*複数系列を用いた伸縮自在なシンボル(Stretchable Symbols with Multiple Sequences)の略

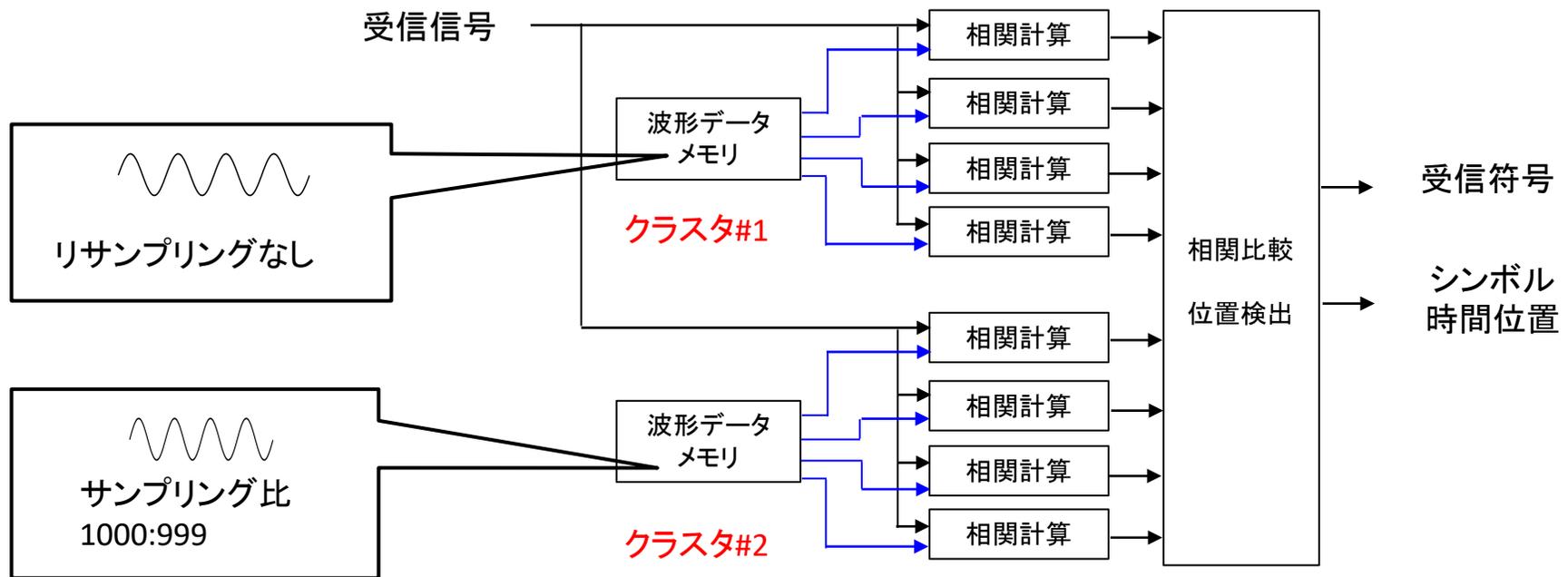
送受信機構成(1)

- 簡易な送受信機構成で不規則なドップラーシフトに対応
- シンボル時間(時間窓)位置を自在に変化



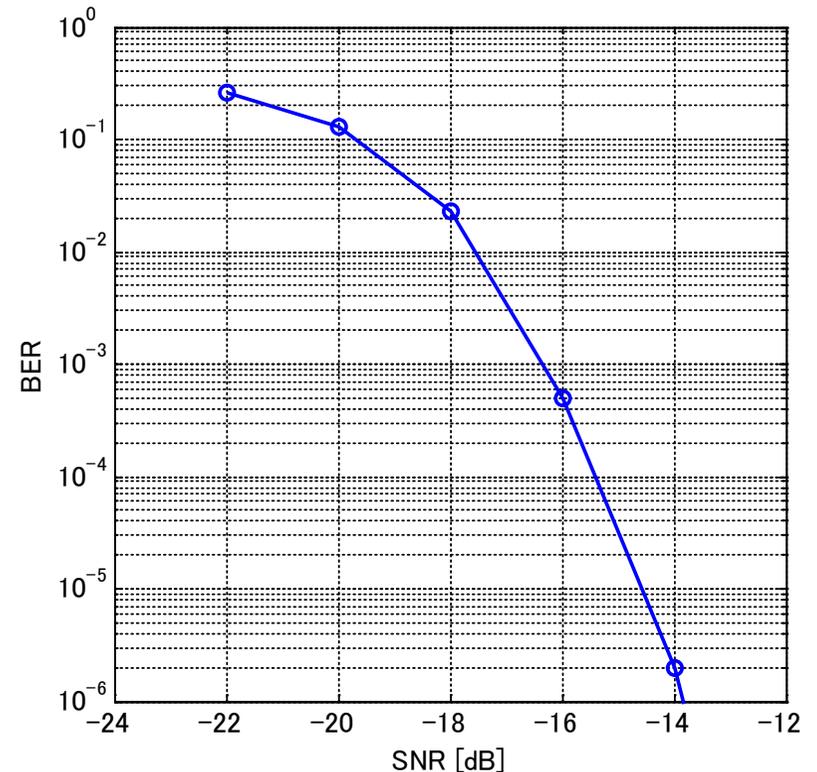
送受信機構成(2)

- 大きなドップラーシフトに対する対応
 - 参照信号を事前にリサンプリング処理したものを用意する
 - クラスタ(波形群)数に応じて対応範囲が広がる



シミュレーション条件

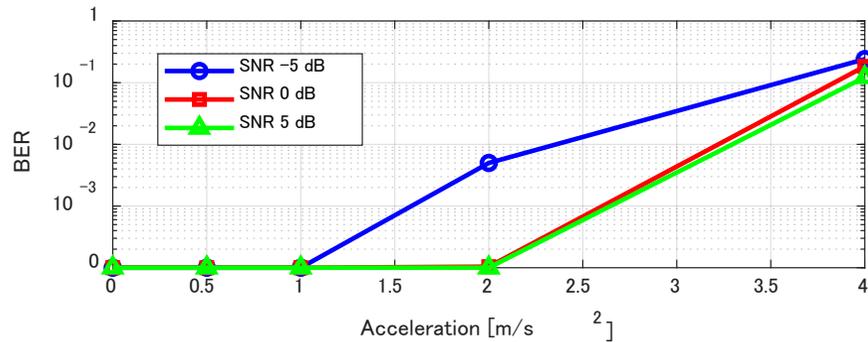
通信仕様 (SSMS)	
サンプリング周波数	250 kHz
周波数帯域	12 kHz ~ 32 kHz
1次変調	SSMS 4値変調
誤り訂正	なし
シンボル長	14 ms (3500 samples)
シンボル間隔長	2 ms (500 samples)
伝送レート	125 bps (1フレーム 200 bits)
1フレーム内シンボル数	100
フレーム長	1.6 s



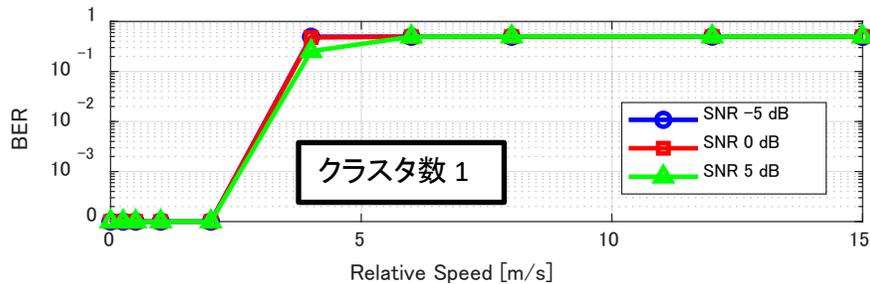
基本通信特性 (白色雑音のみ)

シミュレーション結果

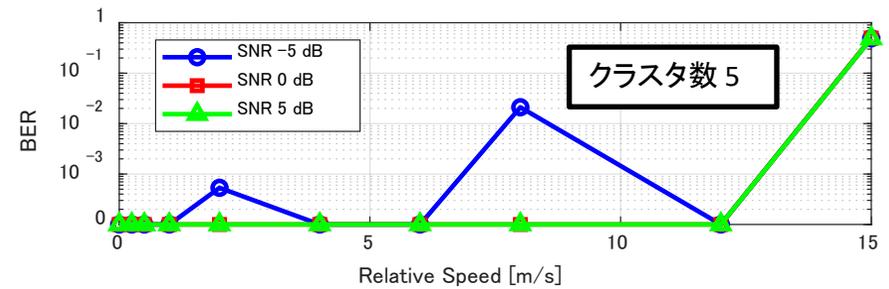
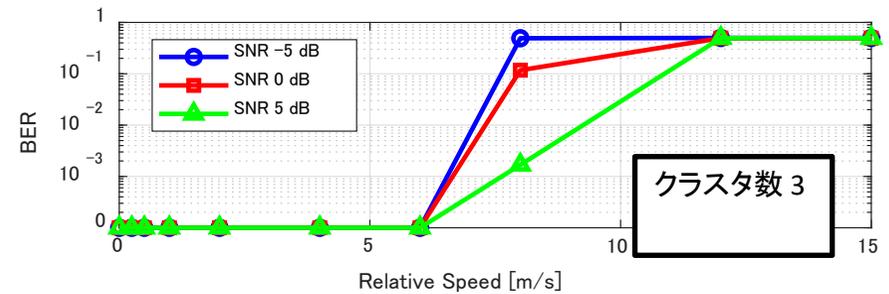
- SN比 0 ~ 5 dBの環境では加速度2 m/s²まで通信可能
- クラスタ数5ではSN比0 dB, 相対速度12 m/s (23ノット) まで通信可能
 - 信号伸縮率 0.993, 0.997, 1, 1.003, 1.007



(a) 加速度に対する評価 (初期速度0, クラスタ数1)



総ビット数 10⁶に対する評価



(b) 相対速度に対する評価 (クラスタ数1,3,5)

舞鶴湾海域試験

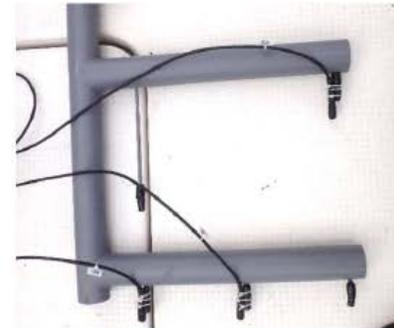
- 2022年11月京都府舞鶴市で海域試験を実施
 - 水深 10 m程度の海域



送信船 うみかぜ



送波器1ch (送波深度: 約1.2m)



受波器3ch (受波深度: 約1.5m)



受信船 アルバトロス



送信制御 P C



変調FPGA,送信D/A



受信A/D、復調FPGA



受信判定 P C

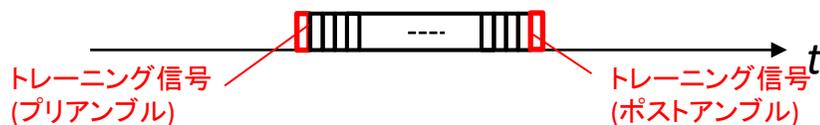
試験条件

SSMS方式と従来方式(直接拡散 & リサンプリング処理)を比較

通信仕様 (SS) 送信1ch, 受信1ch	
サンプリング周波数	250 kHz
周波数帯域	12 kHz ~ 32 kHz
1次変調	DQPSK
誤り訂正	なし
シンボル長	16 ms (4000 samples)
プリアンブル・ポストアンブル長	16 ms (4000 samples)
伝送レート	123 bps (1フレーム 200 bits)
1フレーム内シンボル数	100 (2個はトレーニング)
フレーム長	1.61 s

通信仕様 (SSMS) 送信1ch, 受信1ch, クラスタ数3	
サンプリング周波数	250 kHz
周波数帯域	12 kHz ~ 32 kHz
1次変調	SSMS 4値変調
誤り訂正	なし
シンボル長	14 ms (3500 samples)
シンボル間隔	2 ms (500 samples)
伝送レート	125 bps (1フレーム 200 bits)
1フレーム内シンボル数	100
フレーム長	1.6 s

フレーム構成

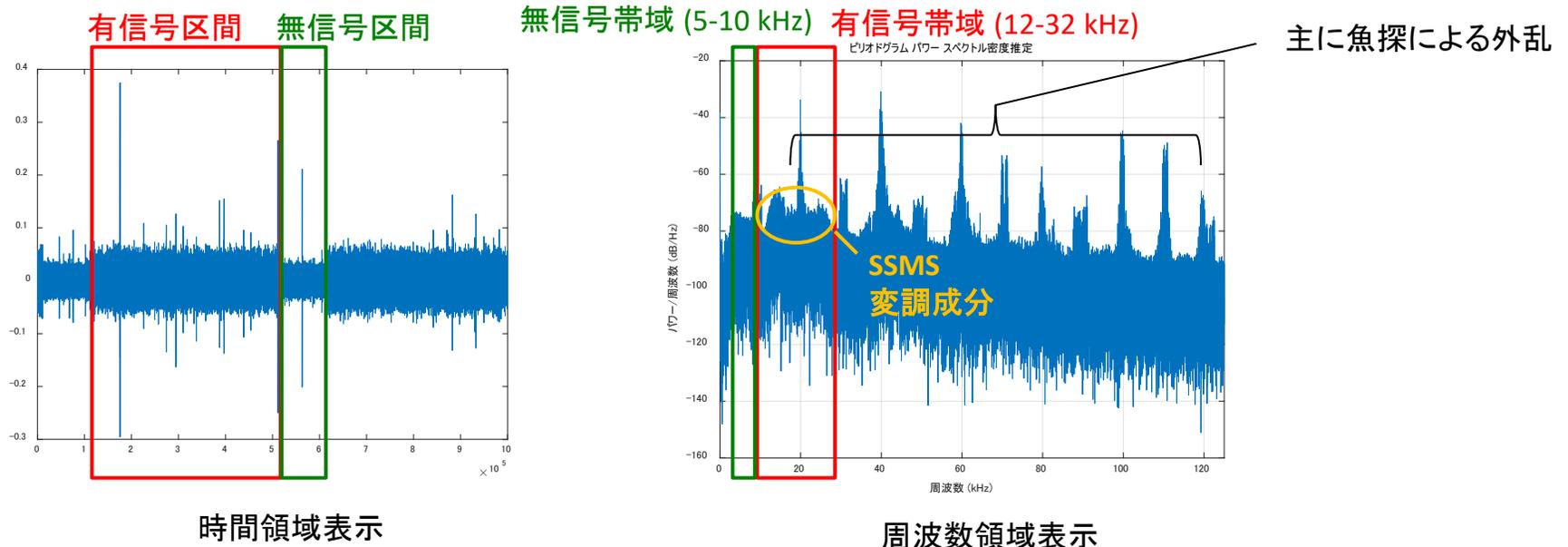


フレーム構成



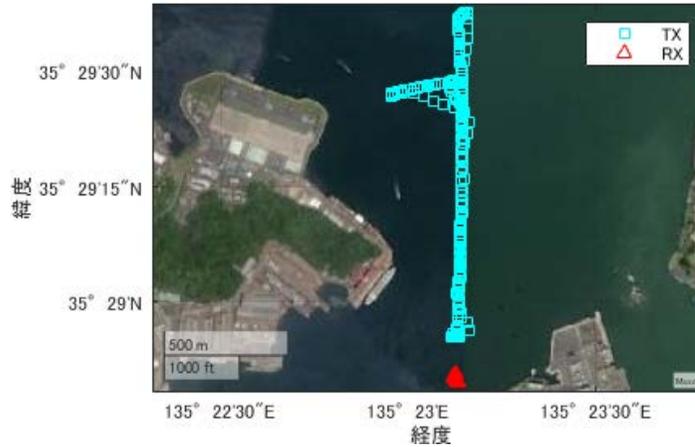
海域試験でのSN比測定方法

- シミュレーションではフレーム先頭位置を検出後、有信号区間と無信号区間の切り出しを行い、それぞれの平均電力を算出
- 実海域データでは居所的な雑音が多く、上記の算出方法は安定しない
- 外部雑音の影響が少ない5kHz～10kHzから背景雑音を抽出して、SN比を計算
 - 周波数帯域あたりの電力値になるように補正済み

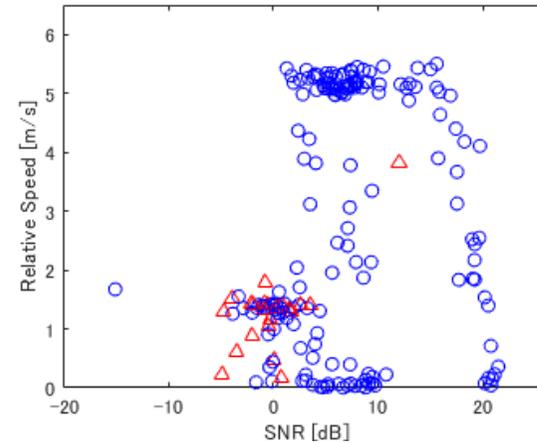
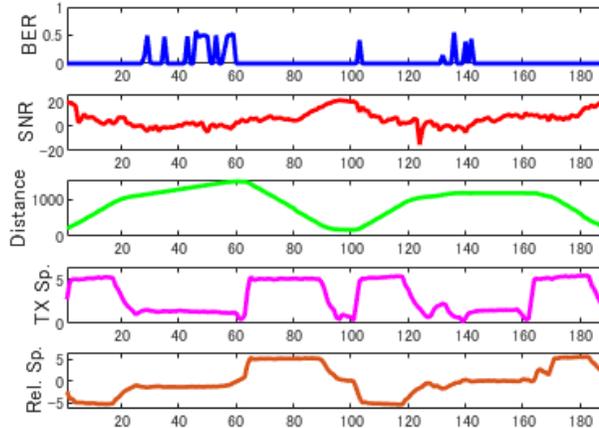


移動試験結果例 (SSMS, 相対速度 5 m/s)

送信機(TX)
受信機(RX)
位置

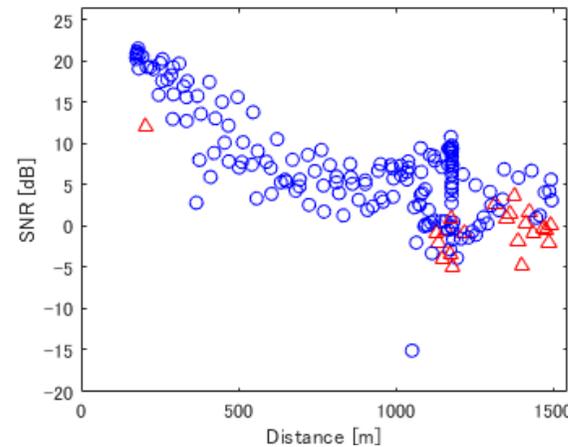


BER
SN比
距離
送信機移動速度
相対移動速度



SN比, 移動速度
に対するフレーム毎
の通信結果

- : ビット誤りなし
- △ : ビット誤りあり

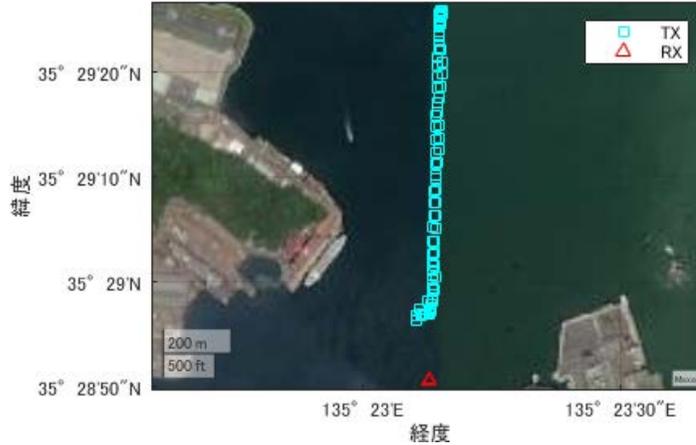


距離, SN比
に対するフレーム毎
の通信結果

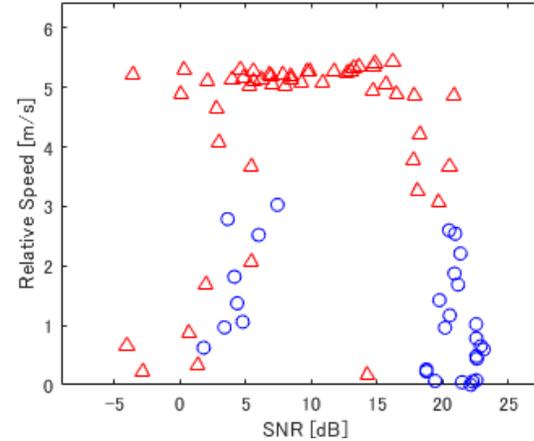
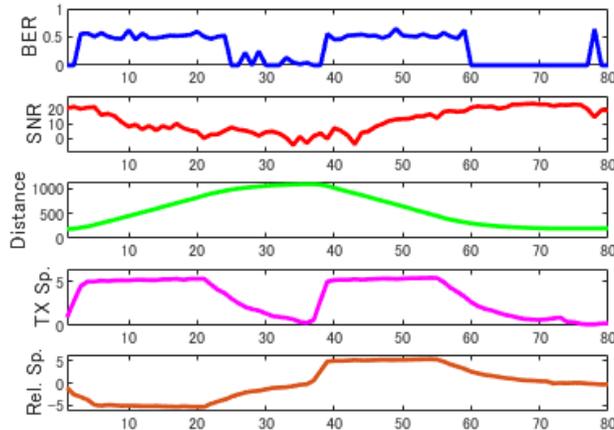
- : ビット誤りなし
- △ : ビット誤りあり

移動試験結果例 (SS & リサンプリング, 相対速度 5 m/s)

送信機(TX)
受信機(RX)
位置

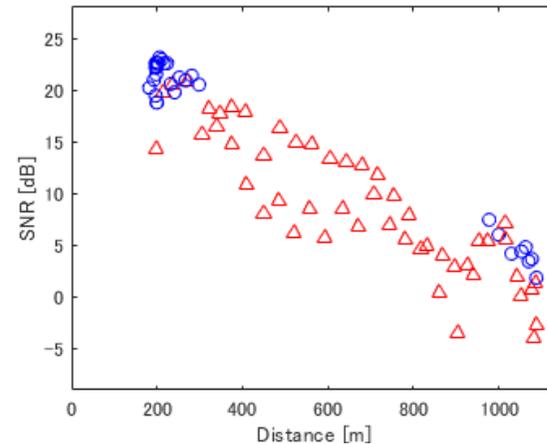


BER
SN比
距離
送信機移動速度
相対移動速度



SN比, 移動速度
に対するフレーム毎
の通信結果

○:ビット誤りなし
△:ビット誤りあり

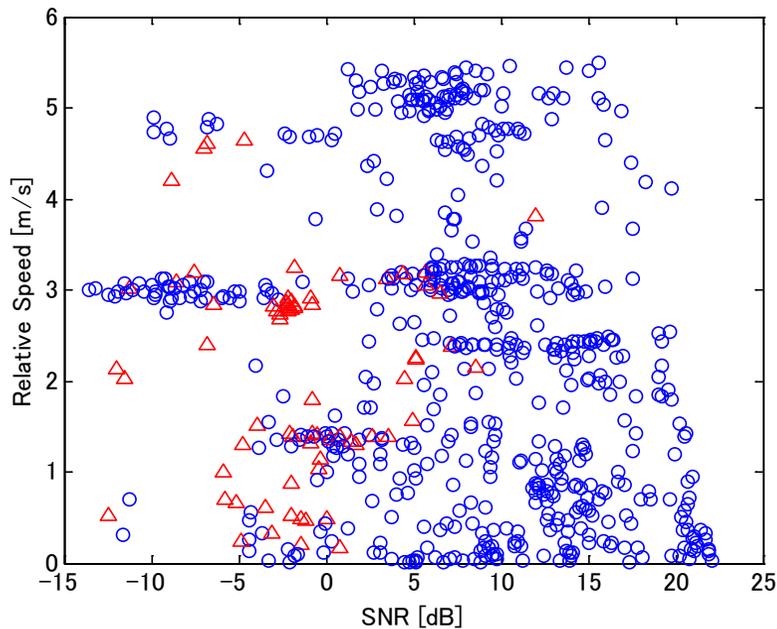


距離, SN比
に対するフレーム毎
の通信結果

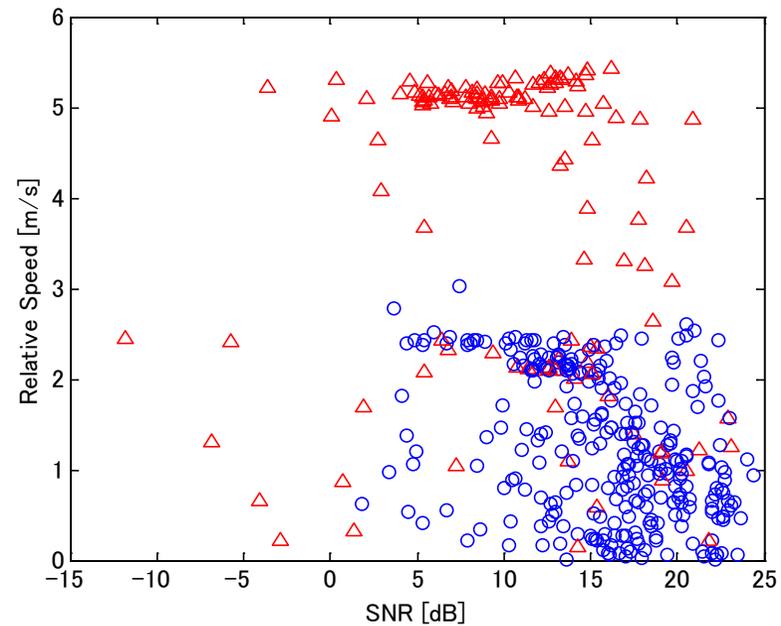
○:ビット誤りなし
△:ビット誤りあり

全試験に対する通信結果

- SSMS方式は従来方式と比べて誤りなくフレーム受信できる割合が高い



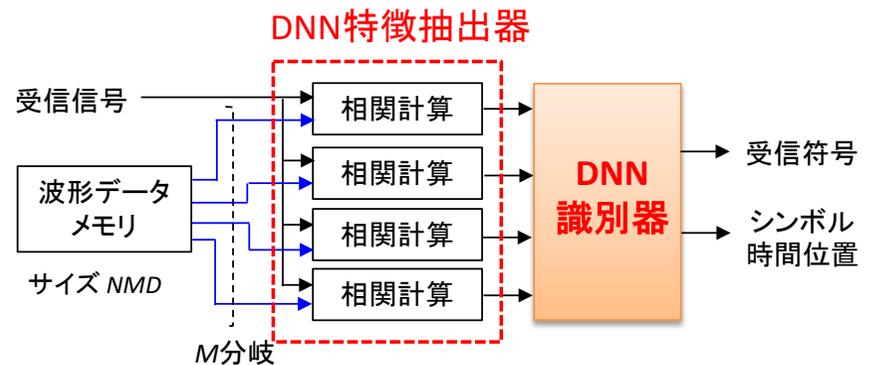
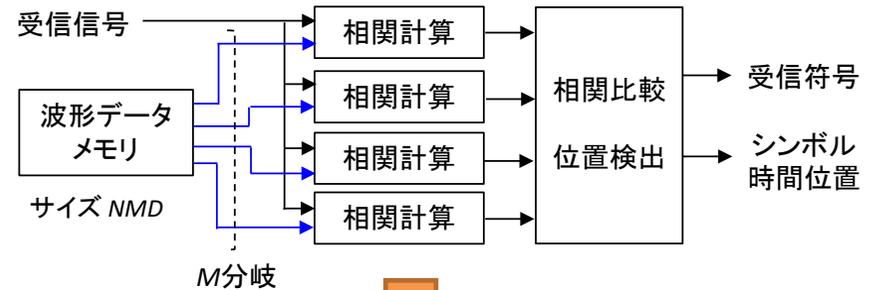
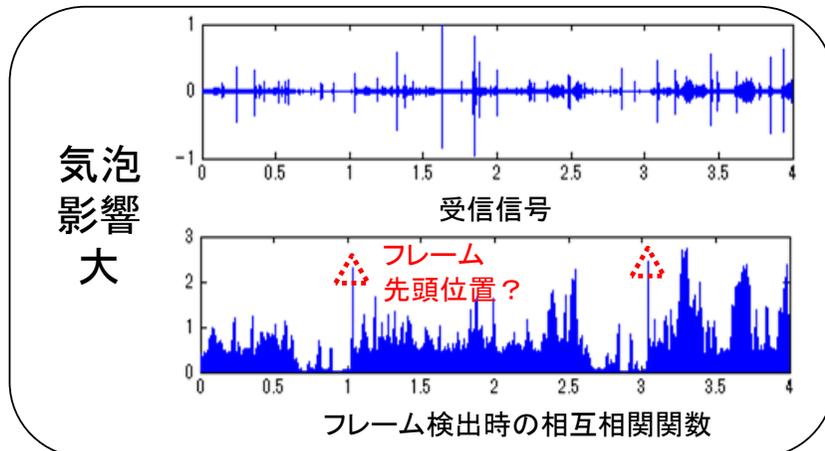
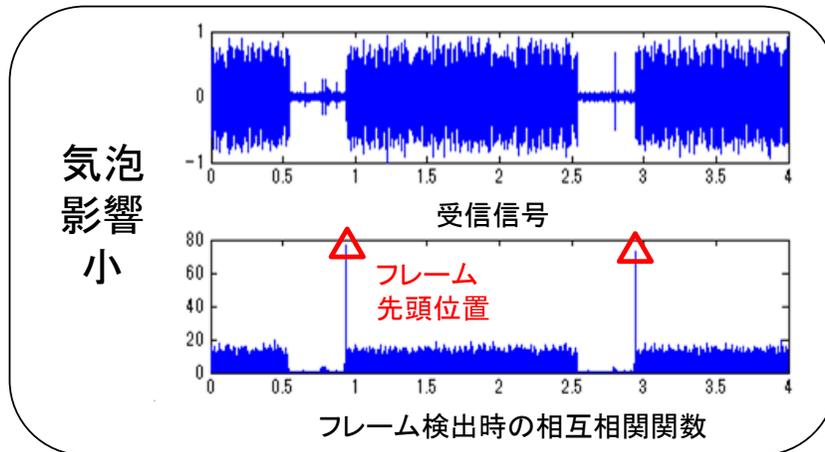
(a) SSMS通信結果



(b) 直接拡散とリサンプリング処理による通信結果

SSMS方式とディープニューラルネットワーク(DNN)

- SSMS受信機の相関比較処理をDNN識別器に置き換えることが容易
 - 相関ピークの検出を画像による物体検出と見なせる
- 気泡による通信不良を克服することが期待される



遠い未来のあらゆる無線受信機は
DNNを利用した波形パターンマッチングに帰結？

まとめ

- 高耐性を有する水中音響通信デジタル変復調方式
 - 周囲騒音、音波反射、ドップラーシフト・伝搬路変動などあらゆる妨害要因にたいしてロバストな水中音響通信方式の実現を目指す
 - 非定常ドップラーシフトに頑健なSSMS方式の紹介
- 今後の予定
 - 水槽試験によるSSMS方式の定量的な通信特性評価
 - SSMS方式とディープニューラルネットワーク(DNN)を組み合わせた受信機構成の通信特性評価

謝辞

本研究は防衛装備庁安全保障技術研究推進制度(JPJ004596)の支援を受けたものです。 21