

電波の届かぬ海の中・音響通信の課題に挑む ～ドップラー効果の抑制技術～

令和5年3月14日

防衛装備庁 艦艇装備研究所
水中対処技術研究部 無人航走体連携研究室

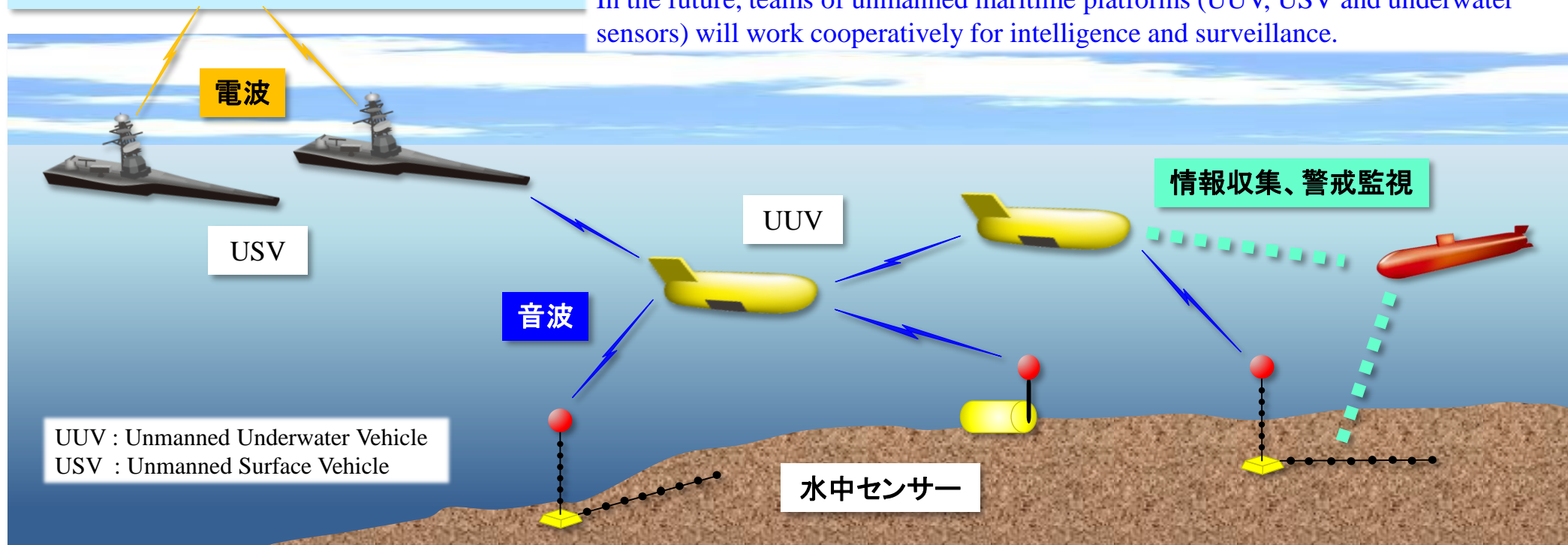
岩間 成裕

水中防衛における通信の必要性

Background

将来の水中防衛においては、多数の無人アセット(UUV(水中無人機)、USV(水上無人機)及び水中センサー等)が相互に連携、協調して自律的に情報収集や警戒監視等のミッションをこなすことが期待される。

In the future, teams of unmanned maritime platforms (UUV, USV and underwater sensors) will work cooperatively for intelligence and surveillance.



特にUUVには水面下の隠密性を利用した運用が想定される。海面に浮上することなく、**電波**の届かない水中で協調して活動するためには、**音波**を用いた通信の高品質化が必要。

For underwater maritime systems to cooperate under the sea where electromagnetic waves propagate poorly under the sea, high-quality underwater acoustic communication is necessary.

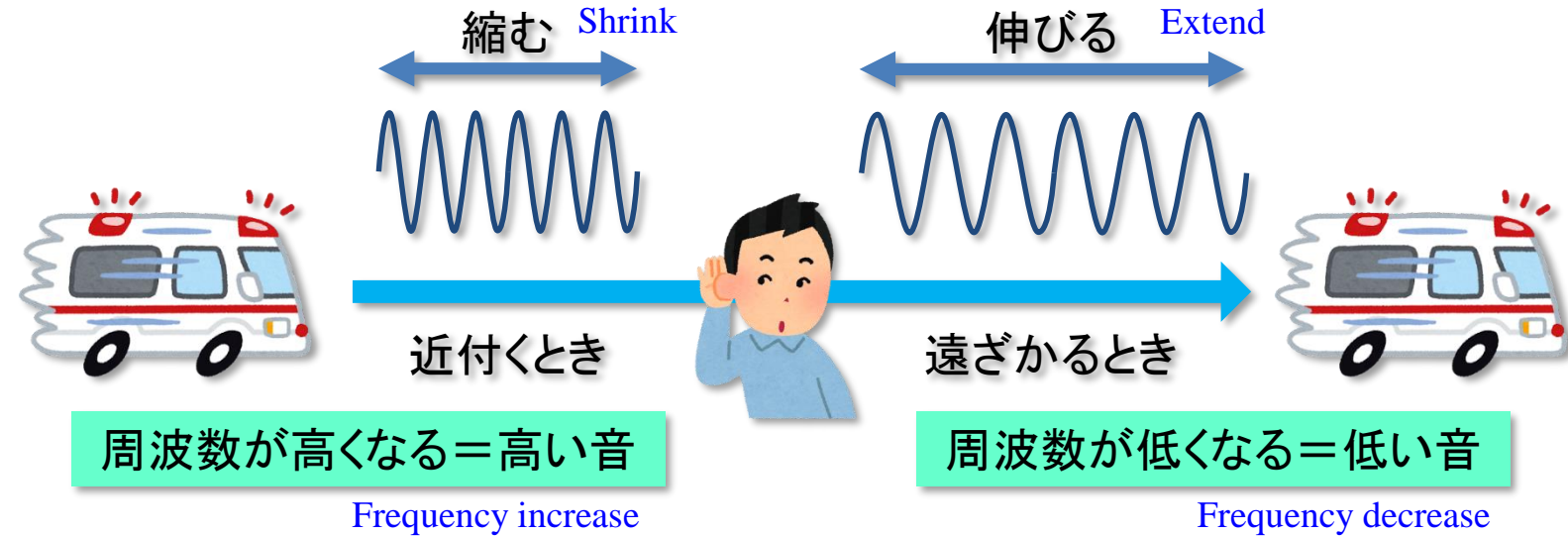
水中音響通信における課題(1/3)

Subject

1. ドップラー効果の影響が大きい

Huge impact caused by the Doppler effect

ドップラー効果とは



ドップラー効果により周波数に変化する(=ドップラーシフト)

Frequency changes with the Doppler effect. (= Doppler shift)

電波や音波を用いた通信において、波が伸縮して形状が変化してしまうと信号を正しく読み取ることが困難になる問題が生じる。

If a waveform changes, a signal cannot be decoded correctly.

図:いらすとや

水中音響通信における課題(2/3)

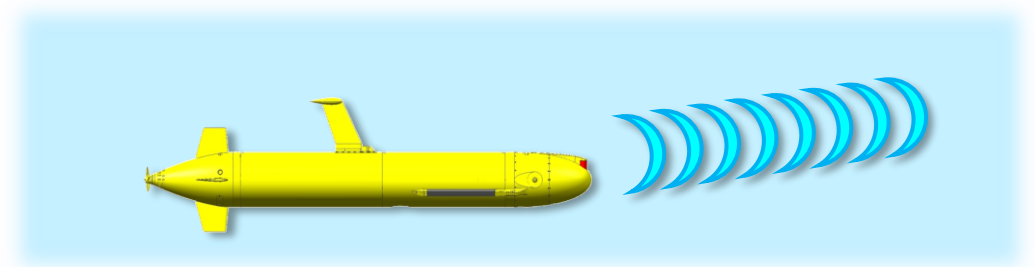
Subject

1. ドップラー効果の影響が大きい

Huge impact caused by the Doppler effect

空中電波通信 Electromagnetic wave communication in the air

水中音響通信 Underwater acoustic communication



移動体の速度	新幹線: 320 km/h	UUV : 4 knot 程度 \approx 7.4 km/h
波の伝播速度	電波 : 3×10^8 m/s (光速)	音波 : 1500 m/s (水の音速)

Change rate of frequency = mobile speed / wave velocity

周波数の変化率は 移動体の速度 ÷ 波の伝播速度 で表されるので

空中電波通信 : 2.96×10^{-7}

水中音響通信 : 1.33×10^{-3}



4桁大きい

水中音響通信は空中電波通信と比較して、とても厳しい条件

Underwater acoustic communication is much more challenging than electromagnetic wave communication in the air.

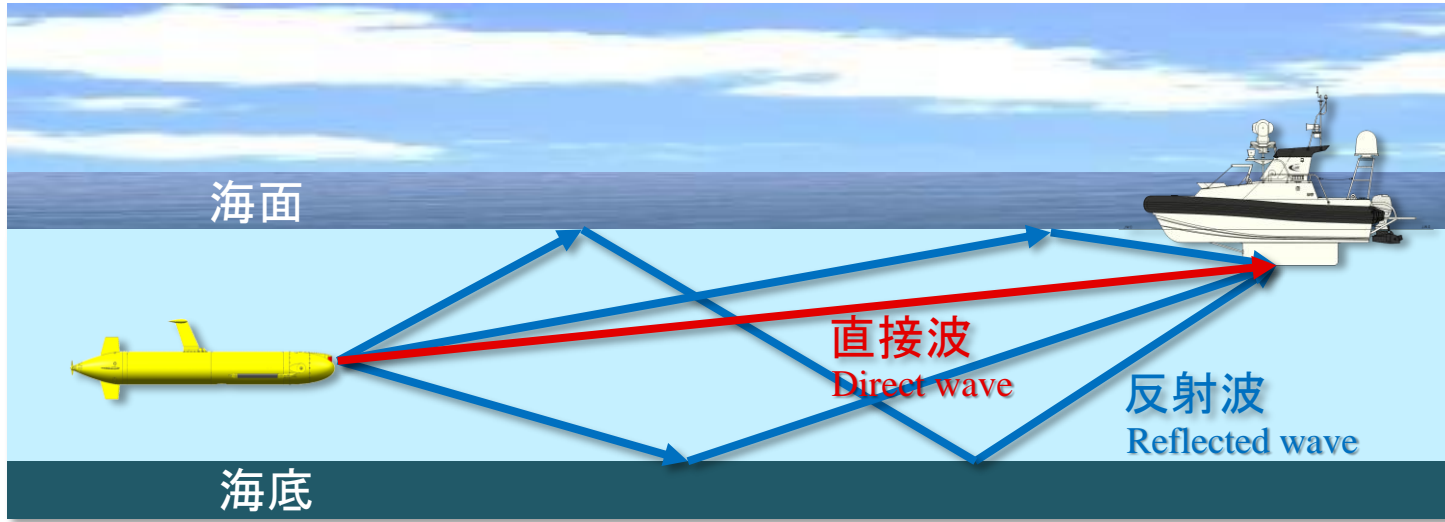
図: いらすとや

水中音響通信における課題(3/3)

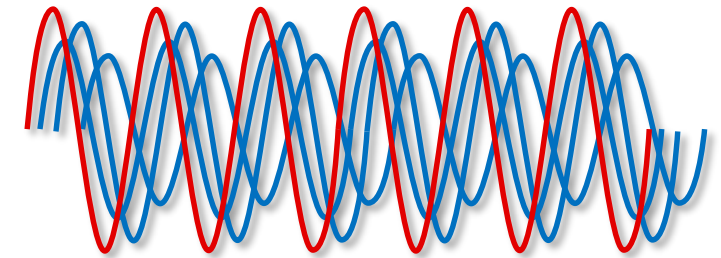
Subject

2. 多重反射波の影響が大きい

Huge impact caused by the multipath propagation.



多数の経路で到来した信号が重なり、読み取ることが困難になる



浅海域での水平方向通信は、海底や海面で反射した信号が無数に遅れて到来することで、信号を正しく読み取ることが困難になる問題が生じる。

In the shallow sea, many waves reflected on the seabed or surface come later than a direct wave, so a signal cannot be decoded correctly.

水中移動体通信の研究

Study on mobile underwater acoustic communication

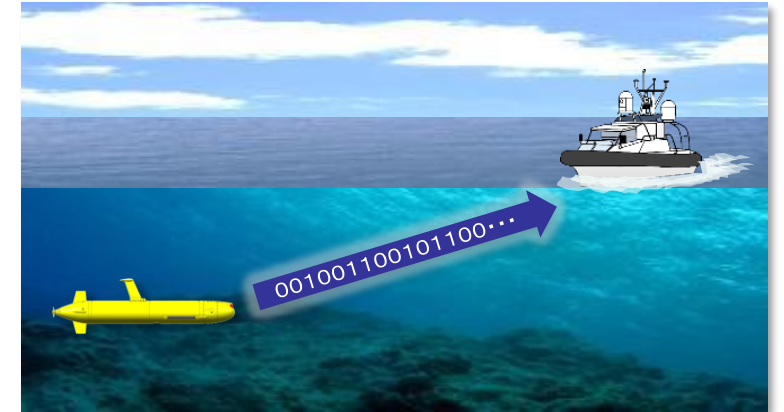
➤ 水中移動体通信の研究

- 令和元～3年度

- FY2019～2021
- Evaluating methods to reduce the Doppler shift effect
- Sea trials with multipath propagations

- ドップラーシフト影響低減技術の実海域実証

- UUV→USV間水平方向通信(多重反射波環境)



➤ 国立研究開発法人 海洋研究開発機構 (JAMSTEC) との研究協力

艦艇装備研究所はJAMSTECとの研究協力協定を締結しており、その枠組みを活用することで、効率的に研究を実施した。

- 双方の試験機材を組み合わせて実施
- 取得データを共有し、各々の研究に活用

Research partnership with JAMSTEC

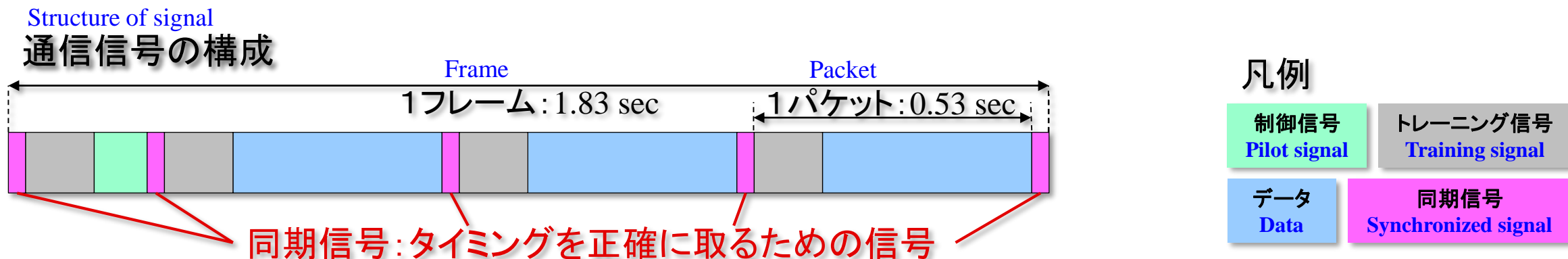
- Device sharing for experiments
- Data sharing

ドップラーシフト影響低減技術(1/2)

Method to reduce the Doppler shift effect

1. 同期信号による伸縮量の算出

Calculation of the amount of a Doppler shift by synchronized signal



前提技術

ドップラーシフトによる信号の伸縮を補正するには、その伸縮量を正確に知る必要がある。同期信号の間隔から算出することで、補正が可能となる。

The signal length variation caused by the Doppler shift can be calculated based on the interval of the synchronized signals.

本研究の Point

同期信号を正確に検出するため、多重反射波への対策が必要。同期信号の検出処理を2回行う対策により同期精度を改善した。

Two-step synchronized signal detection is applied to overcome the impact caused by multipath propagations.

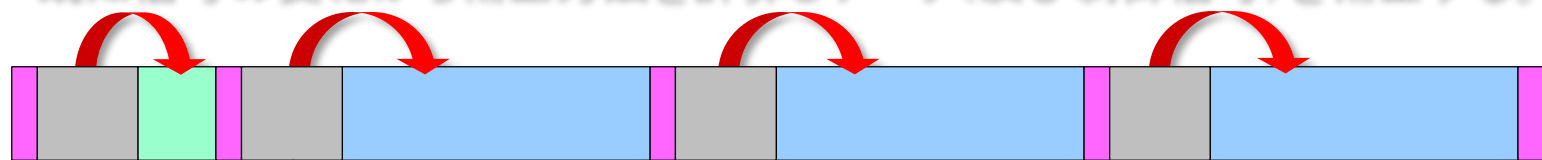
ドップラーシフト影響低減技術(2/2)

Method to reduce the Doppler shift effect

2. D-PLLによる位相の補正

Phase correction by D-PLL

既知信号の変化から補正方法を計算しデータ(及び制御信号)を補正する。



トレーニング信号: 変化を知るための既知の信号

凡例

制御信号
Pilot signal

トレーニング信号
Training signal

データ
Data

同期信号
Synchronized signal

前提技術

トレーニング信号は**多重反射波への対策**に用いられている。送受波間での信号の変化から、元に戻すための補正方法を計算し、それをデータ部分の補正に用いる。

The correction parameters can be calculated by observing the variation of the training signal with the known parameters so that the influence of multipath propagations can be reduced.

本研究の Point

※ Digital - Phase Locked Loop (デジタル位相同期回路)

従来处理では主に信号の強度を補正していたが、位相の補正を行う D-PLL※ を組み込むことで、**ドップラーシフトへの補正**を可能とした。

D-PLL for phase rectification can compensate for the Doppler shift.

海上試験の様子(1/2)

Experiment

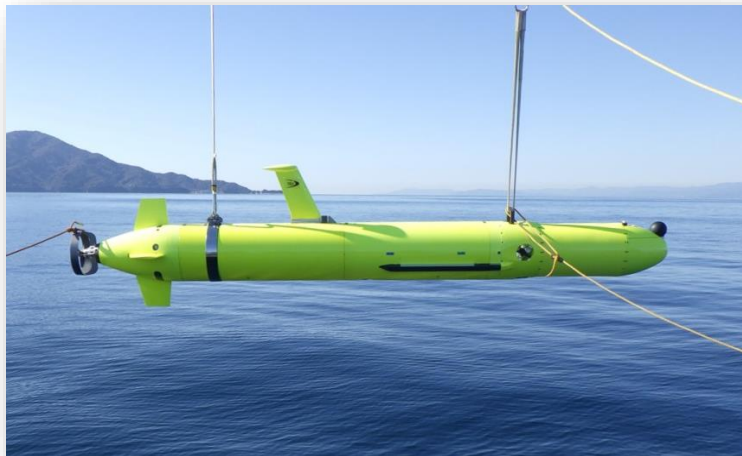


移動体速度 *Mobile speed*

UUV速度: ~5.5 knot

USV速度: ~4.5 knot

最大相対速度: 10 knot
Max relative velocity (約18.5 km/h)



UUV



USV

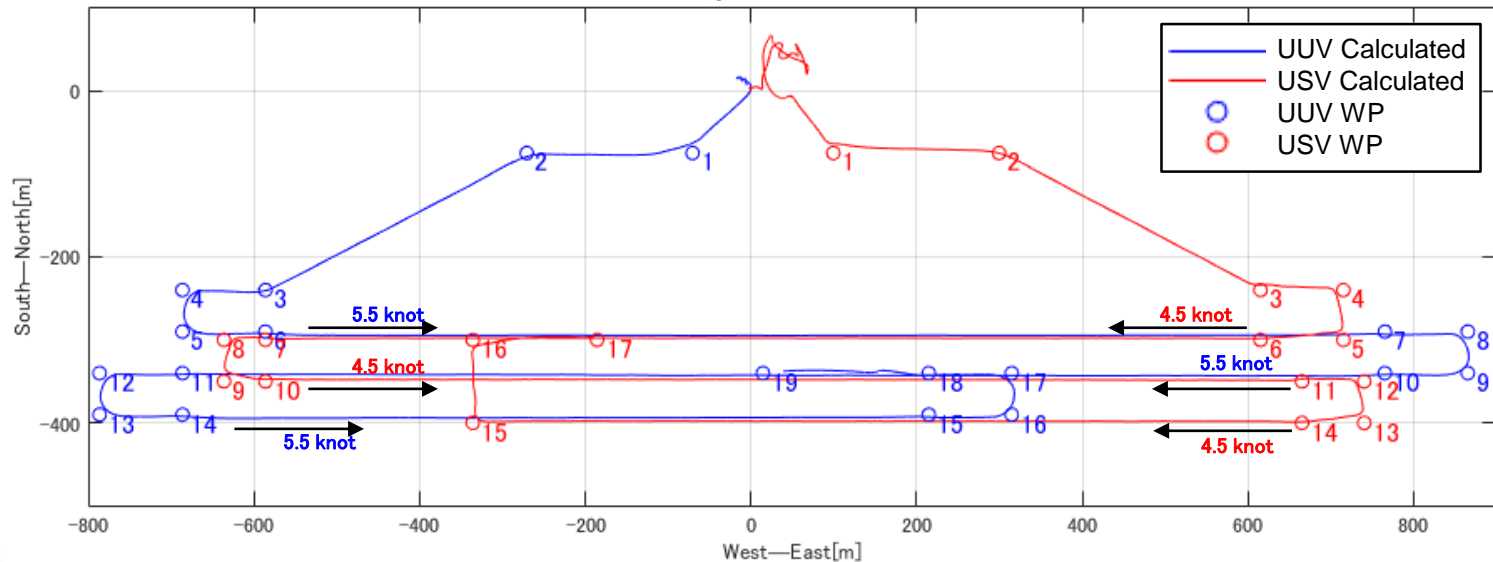


試験台船

海上試験の様子(2/2)

Experiment

航跡図



送受波器

送波器: UUV先端

受波器: USV船底
(ソナードーム内)

Transmitter : Tip of UUV
Receiver : In the dome at USV bottom



UUV (送波器)

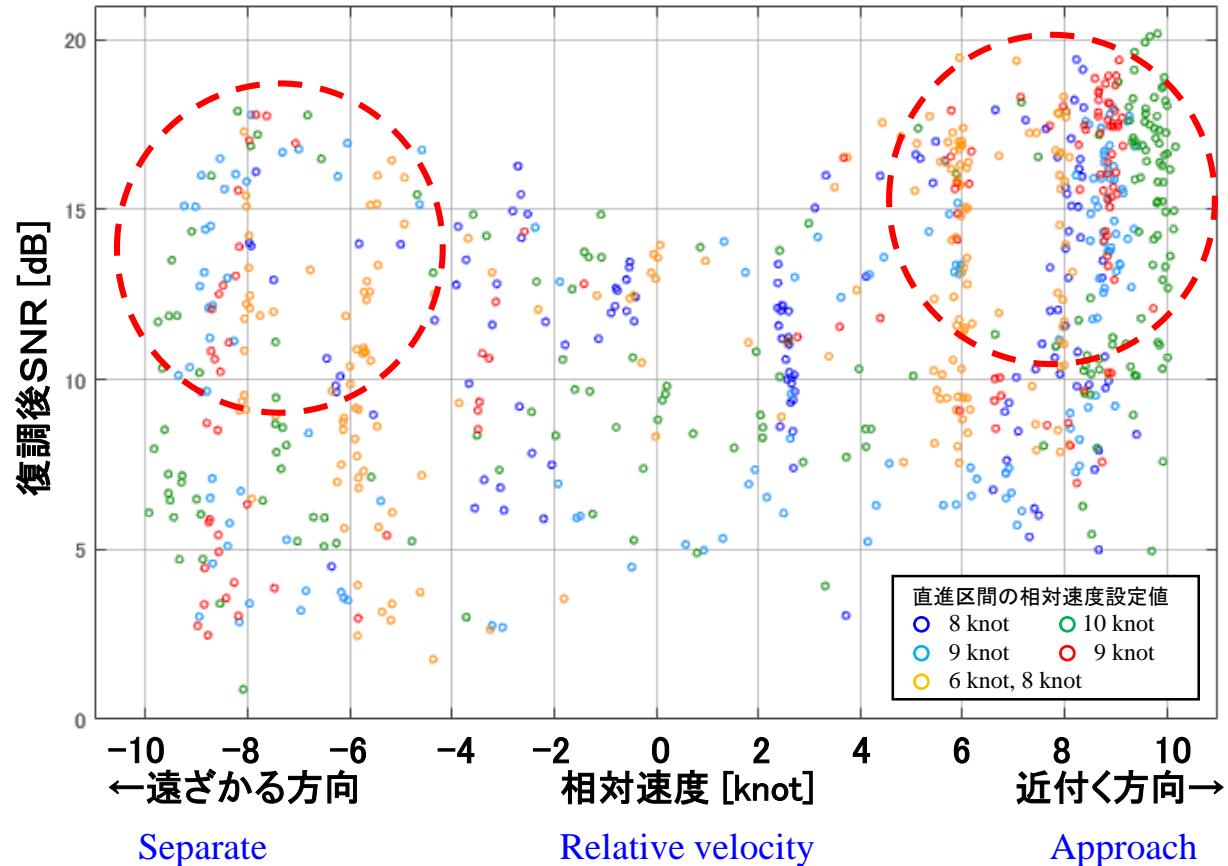


USV (ソナードーム)

海上試験の結果(1/2)

Result

パケットごとの相対速度とSNR



大きな相対速度下において、
高いSNR※で復調※できた。

Demodulation with high SNR can be achieved
when the relative velocity is large.

※ Signal Noise Ratio (信号雑音比)
: 低いほどエラーが発生しやすくなる。

※ 復調: 通信信号をデータに変換する処理
変調: データを通信信号に変換する処理

海上試験の結果(2/2)

Result

Percentage of no bit error packets (Relative velocity > 8 knot)

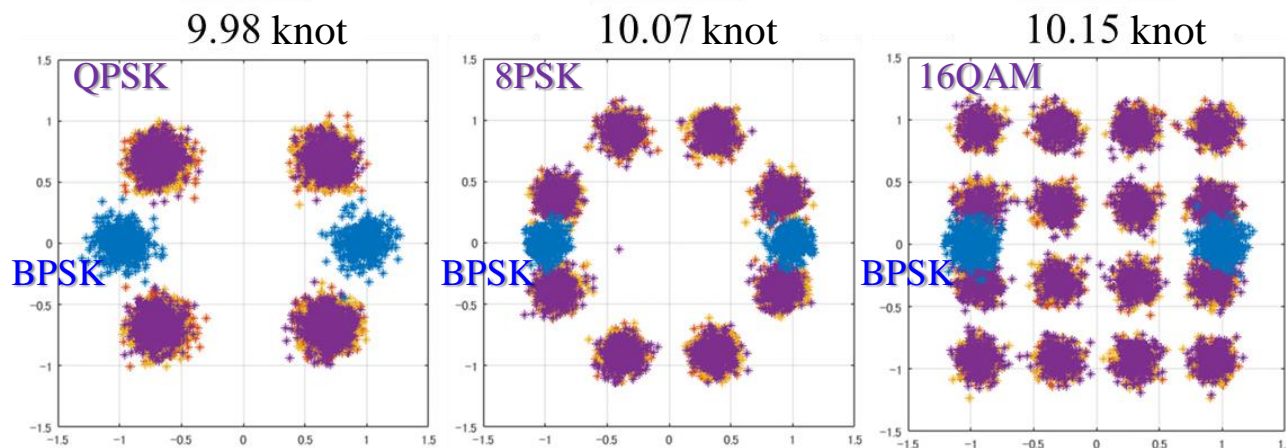
8 knot 以上のドップラーシフトを受けたパケットのうち
ビットエラーが生じなかったパケットの割合

Error correction
code (ECC)

誤り訂正	BPSK※	QPSK	8PSK	16QAM※
無 Not used	92.9 % 6.7 kbps	89.3 % 13.4 kbps	41.4 % 20.1 kbps	10.0 % 26.9 kbps
有 Used	100 % 2.2 kbps	100 % 4.5 kbps	96.6 % 6.7 kbps	66.7 % 9.0 kbps

相対 8 knot 以上において、
誤り訂正なし: BPSK ~ QPSK
誤り訂正あり: BPSK ~ 8PSK で
9割程度をエラーなく復調できた。

相対 10 knot での信号コンスタレーション
(通信に成功した場合の例)



When the relative velocity is over 8 knot, about 90% of packets can be demodulated without bit errors (QPSK without ECC or 8PSK with ECC).

Result

最大 10 knot の大きな相対速度下
での音響通信に成功

Underwater acoustic communication at a relative velocity of 10 knot was achieved.

※ Phase Shift Keying(位相変調方式)、Quadrature Amplitude Modulation(直交振幅変調)
BPSK, QPSK, 8PSK, 16QAMの順に通信速度が向上するが、エラーが発生しやすくなる。

- **ドップラーシフト影響低減技術を実海域で実証し、最大 10 knot の相対速度下で通信に成功した。**

The effectiveness of the methods to reduce the Doppler shift effect was validated. Underwater acoustic communication at a relative velocity of 10 kt was achieved.

- **次の課題は、より実用化へ近づけること。令和5～7年度の「先進技術の橋渡し研究」においてUUV-UUV間での水中通信の研究を実施する計画。音響のみならず光を用いた通信との統合制御に取り組み、さらなるロバスト性の向上を目指す。**

Research on UUV-to-UUV underwater communication is planned from FY2023 to FY2025. Underwater acoustic communication will be integrated with optical communication to realize robust communication.

- **JAMSTECとの研究協力により、水中音響通信に関する多くの知見が得られている。無人アセット防衛能力の早期獲得を実現するため、今後も研究協力を活用し、外部の成果を取り入れながら、効率的に水中通信の研究を進めていく。**

Research partnership with JAMSTEC accelerates this project. Underwater communication will be studied efficiently by research partnership and introducing advanced technologies.