

# マルチパス・ドップラーチャネルにおける ICI キャンセル水中 OFDM 通信システムの試作

和田 知久<sup>1)</sup> 大城 史帆<sup>2)</sup> キャサリン・アキオヤ<sup>3)</sup> 山田 浩正<sup>4)</sup>

- 1) 琉球大学 工学部工学科知能情報コース, [wada@ie.u-ryukyu.ac.jp](mailto:wada@ie.u-ryukyu.ac.jp)
- 2) 琉球大学 情報基盤統括センター, [shiho@cs.u-ryukyu.ac.jp](mailto:shiho@cs.u-ryukyu.ac.jp)
- 3) 琉球大学理工学研究科 知能情報プログラム
- 4) OKI コムエコーズ、静岡

**あらまし** 本技術報告は、直交周波数分割多重すなわち OFDM 方式を用いた水中音響無線通信システムのマルチパス環境におけるドップラー耐性向上に関する。以前提案した 2 段階ドップラー補償アルゴリズムに対して、主波のドップラー対策を行う場合、その他の到来波が異なる角度から入射するとドップラーズレが異なり、2 段階ドップラー補償アルゴリズムでは不完全な補償となり、サブキャリア間干渉が発生し、エラー率が向上する。本報告では、修正型遅延ドップラープロファイラーを導入し、複数 TAP イコライザーでサブキャリア間干渉するシステムを試作し、プールおよび海洋実験を実施したので、その概要を報告する。

**キーワード** 水中音響通信、ネットワーク、直交周波数分割多重、ドップラー効果、キャリア間干渉

## A prototype ICI Canceling Underwater OFDM Communication system for Multi-path Doppler Channel

Tomohisa Wada<sup>1)</sup>, Shiho Oshiro<sup>2)</sup>, Catherine Akioya<sup>3)</sup> and Hiromasa Yamada<sup>4)</sup>

- 1) Dept. of Engineering, University of the Ryukyus, Okinawa Japan
- 2) Information Technology Center University of the Ryukyus
- 3) Graduate School of Engineering and Science, University of the Ryukyus, Okinawa Japan
- 4) OKI Com-Echoes, Shizuoka Japan

**Abstract** This technical report concerns the improvement of Doppler tolerance in multipath environments for underwater acoustic radio communication systems using orthogonal frequency division multiplexing, or OFDM. For the previously proposed two-step Doppler compensation algorithm, when the Doppler countermeasure for the main wave is applied, the Doppler slew is different when other arriving waves enter from different angles, and the two-step Doppler compensation algorithm results in incomplete compensation, causing inter-subcarrier interference and increasing the error rate. In this report, we introduce a modified delayed Doppler profiler and report a prototype inter-subcarrier interference system with multiple TAP equalizers, which was tested in pool and ocean experiments.

**Keywords** Underwater Acoustic Communication, Networking, OFDM, Doppler effect, Inter-Carrier-Interference.

### 文 献

- [1] 特許第 6707737 号、「位置変動に対して性能低下防止機能を有する OFDM 変調を用いた水中超音波通信装置」、琉球大学、沖縄工業高等専門学校、OKI コムエコーズ。
- [2] Mohammad Ariful Hoq, Shiho Oshiro, and Tomohisa Wada, “Two steps Doppler compensation Algorithm from moving AUV to AUV/Mother Ship for OFDM-based UWA communication system,” IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security, VOL.20, No.12, December 2020.
- [3] Shiho Oshiro, Catherine Akioya, Hiromasa Yamada and Tomohisa Wada, “A prototype ICI Canceling Underwater OFDM Communication system for Multi-path Doppler Channel,” MTS/IEEE OCEANS 2023 Mississippi Coast Coliseum & Convention Center, September 25-28, 2023.
- [4] Catherine Akioya, Shiho Oshiro, Hiromasa Yamada and Tomohisa Wada, “A Modified Delay and Doppler Profiler based ICI Canceling OFDM Receiver for Underwater Multi-path Doppler Channel,” IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security, VOL.23, No.7, pp1-8, July 2023.

# マルチパス・ドップラーチャネルにおける ICIキャンセル水中OFDM通信システムの試作

和田知久、大城史帆、キャサリンアキオヤ(琉球大)  
山田浩正(OKIコムエコーズ)

参考:

Shiho Oshiro, Catherine Akioya, Hiromasa Yamada and Tomohisa Wada, "[A prototype ICI Canceling Underwater OFDM Communication system for Multi-path Doppler Channel.](#)"  
MTS/IEEE OCEANS 2023 Mississippi Coast Coliseum & Convention Center, September 25–28, 2023.

1

Slide1

## アウトライン

1. 研究目的・背景
2. 水中OFDM通信システムアーキテクチャ
3. プール実験結果
4. 海洋実験結果
5. 結論

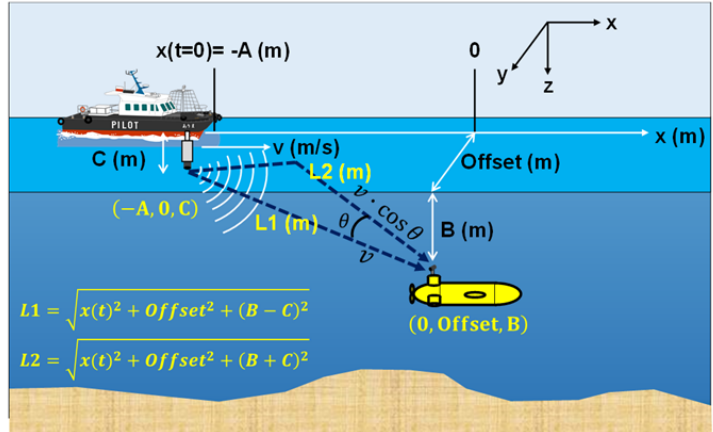
2

Slide2

# 水中OFDM通信での課題

左図に示すような、マルチパス・ドップラー効果

- L1: 直接パス
- L2: 海面反射による遅延パス
- 角度の差により、パスごとのドップラー効果が変わる



3

Slide3

# マルチパス・ドップラー対策

従来:  
複数受信エレメントにより指向性を設けて、直接波のみを受信し、単一のドップラー対策を行う

提案:  
複数の伝搬パスごとに、以下4パラメータを求め

- 複素振幅減衰量  $r$
- 相対遅延時間  $\tau$
- ドップラー周波数ズレ量  $\alpha$
- 受信信号の伸び縮み係数  $\beta$

ICIキャンセルするマルチタップイコライザー

修正型  
遅延ドップラープロファイラー  
A modified  
Delay and Doppler  
Profiler (mDDP)

4

Slide4

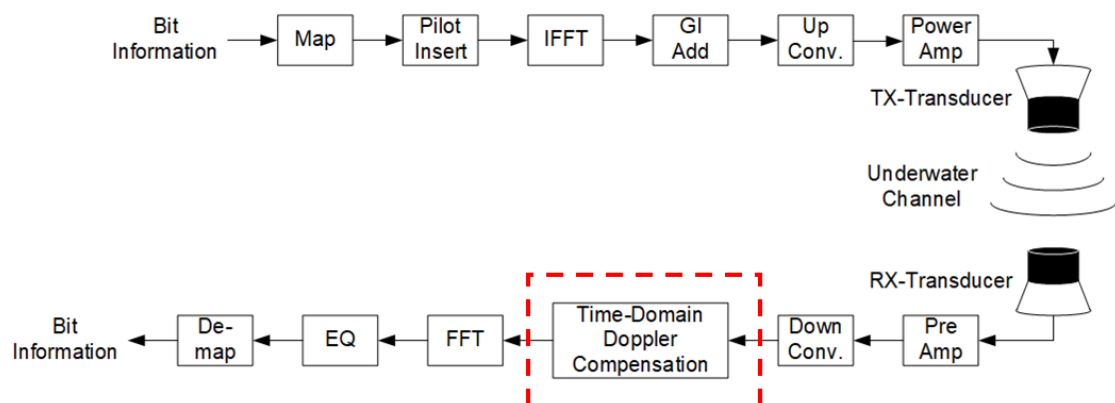
# アウトライン

1. 研究目的・背景
2. 水中OFDM通信システムアーキテクチャ
3. プール実験結果
4. 海洋実験結果
5. 結論

5

Slide5




# 典型的な水中OFDM通信システム

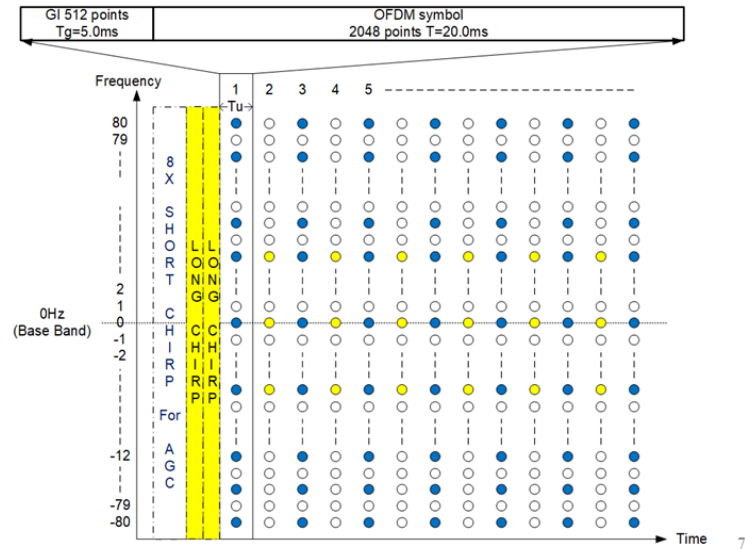


6

Slide6

# OFDMサブキャリア配置

-  DATA
-  Scattered Pilot (SP)
-  Continuous Pilot (CP)



Slide7

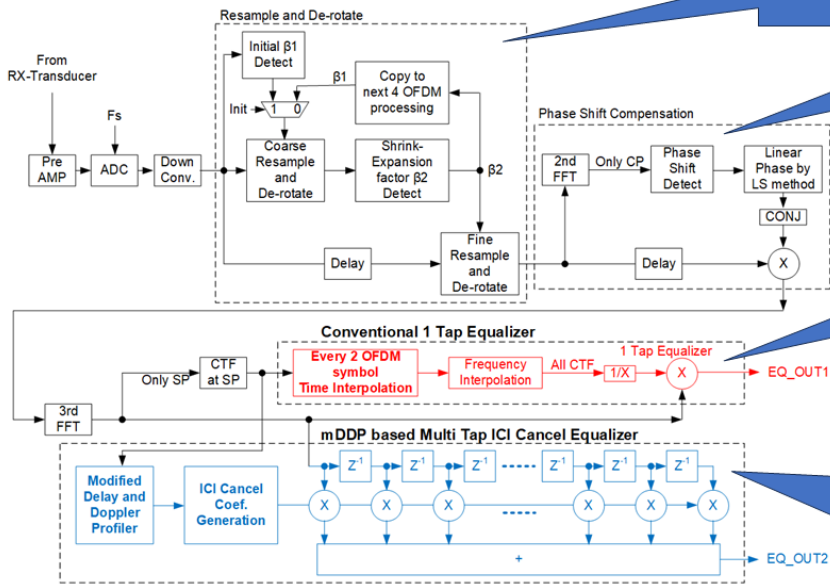
# OFDMシステム 諸元

- FFTサイズ: 2048
- スキャタードパイロット(SP)は、周波数方向は2サブキャリアごとで、時間方向は2OFDMシンボルごとに挿入
- ICIキャンセルのイコライザー TAP数は今回11として評価

Parameters	Value
Sampling Frequency $F_s$	102.4kHz
Band Width (Center frequency)	8 kHz (16kHz)
FFT size	2048
OFDM symbol length $T$	20.0 ms (2048 point)
Guard Interval length $T_g$	5.0 ms (512 point)
Sub-carrier spacing	50 Hz
Number of sub-carrier	161
Number of Scattered pilot	81 every 2 OFDM symbol
Number of Continuous pilot	13
Carrier Modulation	QPSK/16QAM/64QAM
Number of Taps in ICI Canceling Equalizer	11

Slide8

# 受信側詳細ブロック図



2段階リサンプル・デローテーション  
(受信信号の伸び縮み処理)

CPによる、位相補正

従来型イコライザー

新提案手法:  
①mDDPによるマルチパス解析  
②ICIキャンセル係数計算  
③複数TAPイコライザーによるICIキャンセル低減

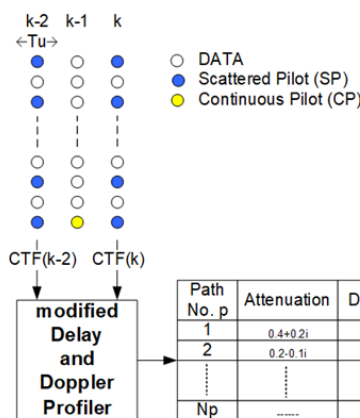
Slide9

# 修正型遅延ドップラープロファイラー(mDDP)

$N_p$ パスの各遅延波のパラメータをSPから推定する。

各遅延波パラメータ

- 複素振幅減衰量  $r$
- 相対遅延時間  $\tau$
- ドップラー周波数ズレ量  $\alpha$
- 受信信号の伸び縮み係数  $\beta$



Path No. p	Attenuation	Delay time	Doppler shift	Sampling CLK Error
1	0.4+0.2i	9.3 point	0.003	1.1E-5
2	0.2-0.1i	122.3 point	0.05	2E-4
...	...	...	...	...
$N_p$	-----	-----	-----	-----

参考:

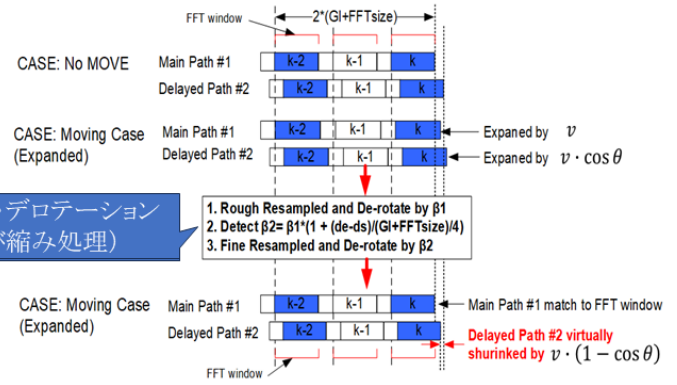
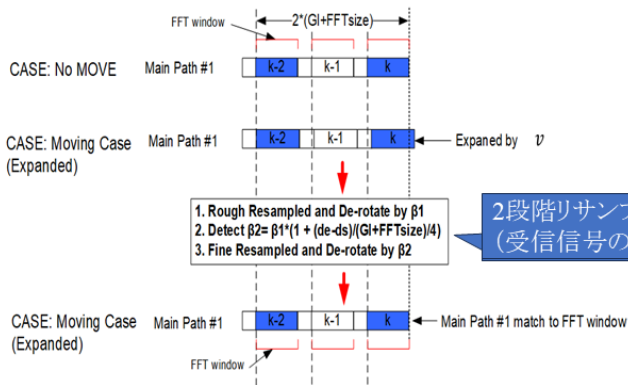
Catherine Akioya, Shiho Oshiro, Hiromasa Yamada and Tomohisa Wada, "A Modified Delay and Doppler Profiler based ICI Canceling OFDM Receiver for Underwater Multi-path Doppler Channel," IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security, VOL.23, No.7, pp1-8, July 2023.

Slide10

# 受信側での伸び縮み処理について

## (a) Single path case

## (b) Case of Multi-path with different Doppler Shift



11

Slide11

# アウトライン

1. 研究目的・背景
2. 水中OFDM通信システムアーキテクチャ
3. プール実験結果
4. 海洋実験結果
5. 結論

12

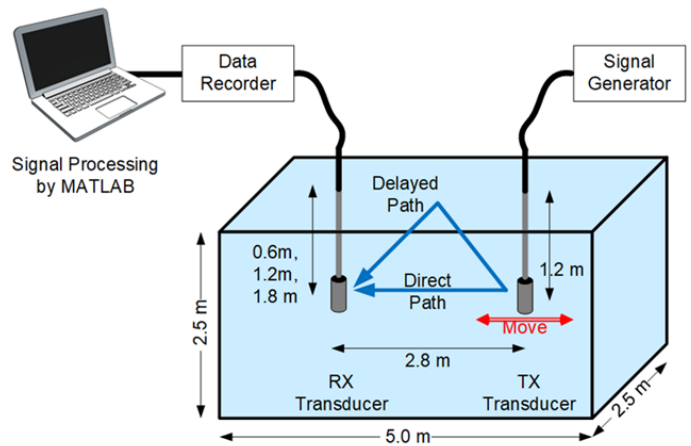
Slide12

# プール実験セットアップ

## 無反射プール実験パラメータ

(水面反射でマルチパスを発生させる)

- 送信トランスデューサー深度: 1.2 m
- 受信トランスデューサー深度: 0.6m / 1.2m / 1.8 m
- 受信トランスデューサーを固定して、送信トランスデューサーを片道50cmを0.625秒で、往復動作させる

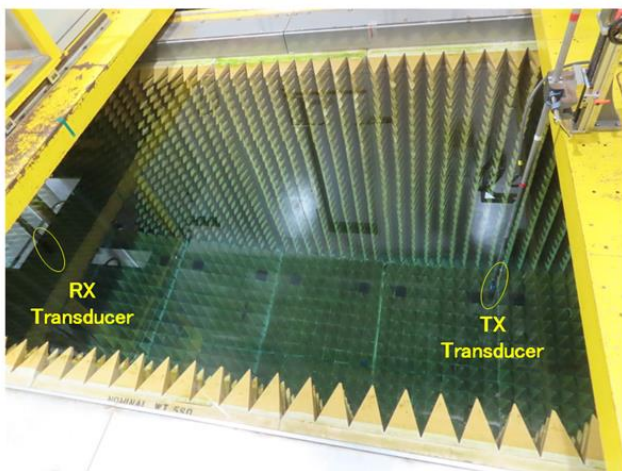


13

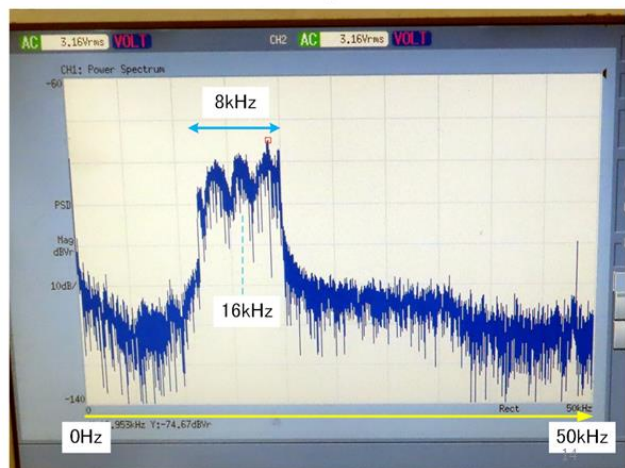
Slide13

# プール実験写真と、受信スペクトラム

## Photo of Non-reflection



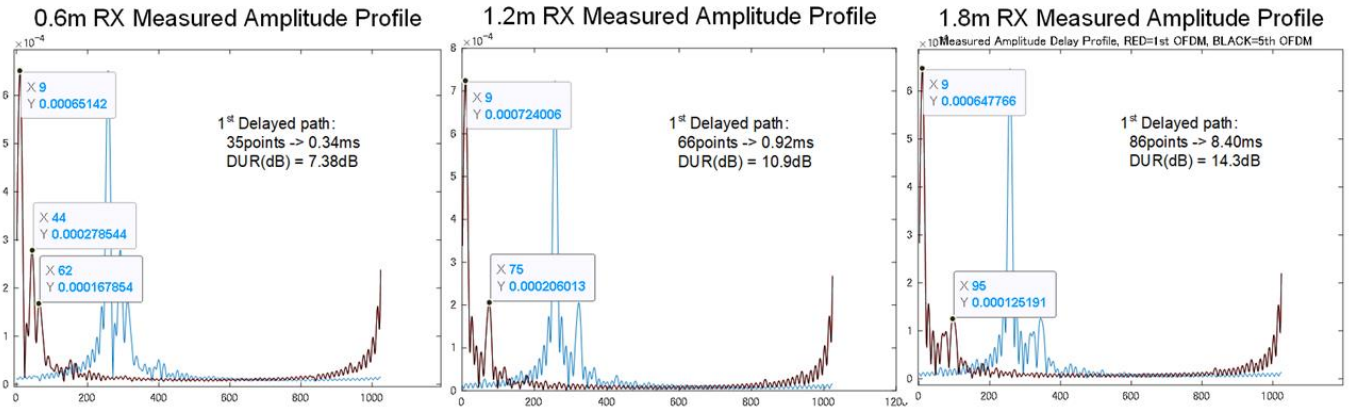
## Measured Spectrum at Pool Experiment



Slide14



# プール実験でのマルチパス測定 (振幅遅延プロファイル)

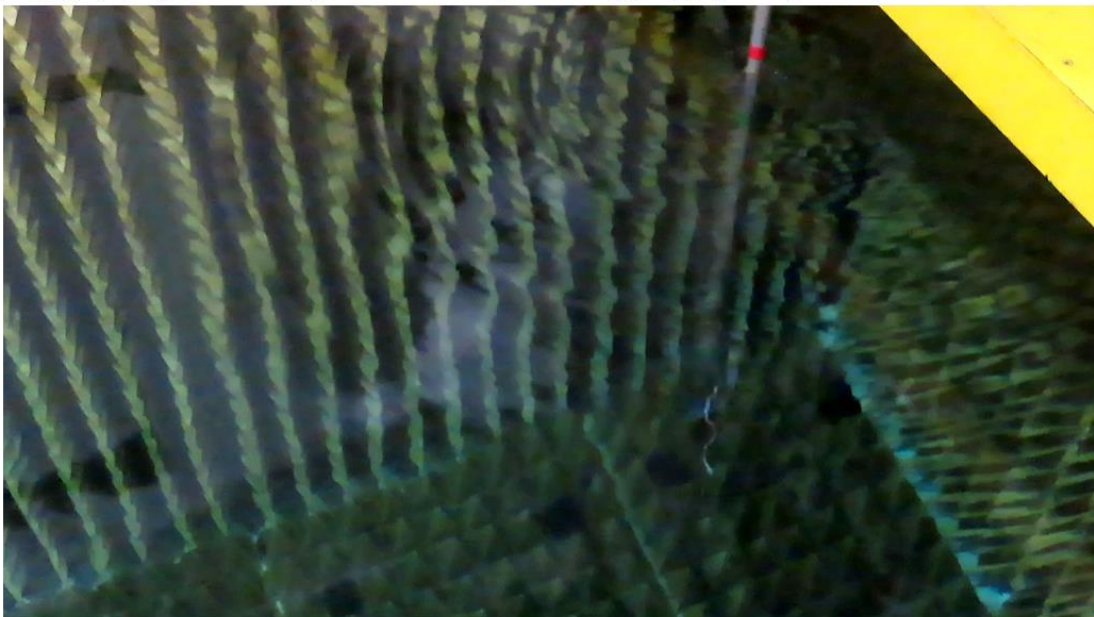


15

Slide15



# 送信トランスデューサー移動ビデオ

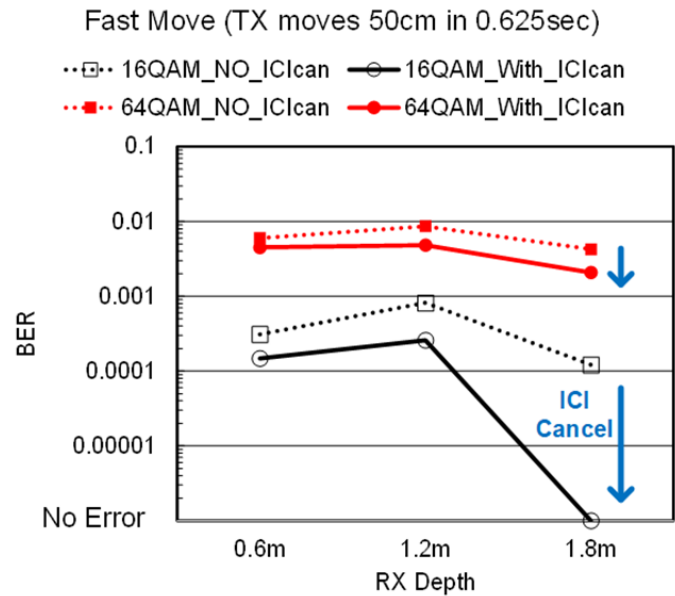


16

Slide16

## プール実験結果

- 64QAM (RX depth = 1.8 m)  
BER is decreased roughly half from 0.00636 to 0.00291
- 16QAM (RX depth = 1.8 m)  
BER is decreased from 0.0001 to free



17

Slide17

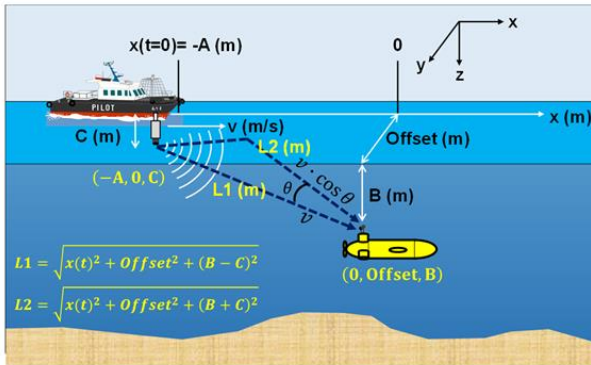
## アウトライン

1. 研究目的・背景
2. 水中OFDM通信システムアーキテクチャ
3. プール実験結果
4. 海洋実験結果
5. 結論

18

Slide18

# 海洋実験状況@駿河湾 2023年3月



19

Slide19

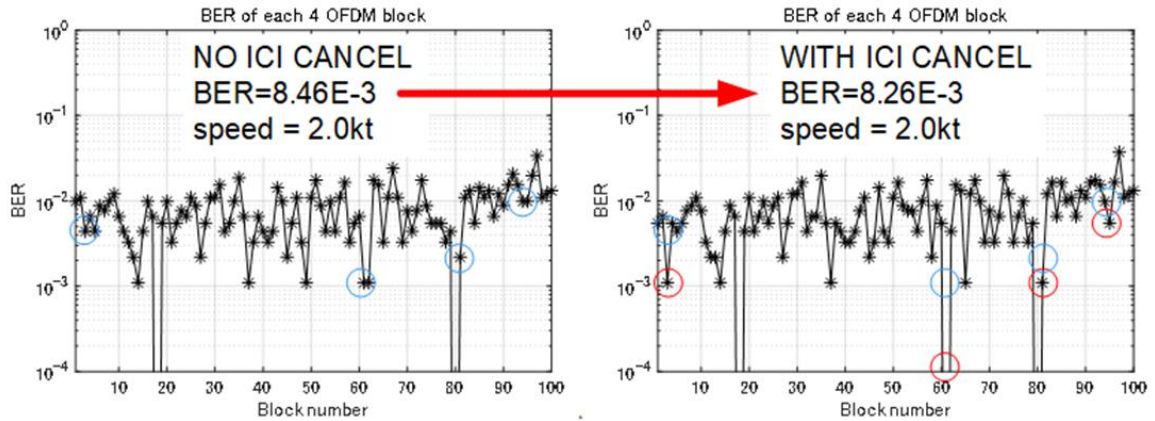
## 2つの実験シナリオ

- 船速度: 2 knots
  - QPSK変調  
(船のノイズ大きく、高次変調では BER高い)
  - 最接近距離 offset=9 m
  - RX深度: 20m
  - TX深度: 2m
- 船速度: 7.5 knots
  - QPSK変調  
(船のノイズ大きく、高次変調では BER高い)
  - 最接近距離 offset=13 m
  - RX深度: 20m
  - TX深度: 2m

20

Slide20

# 船速度: 2 knots

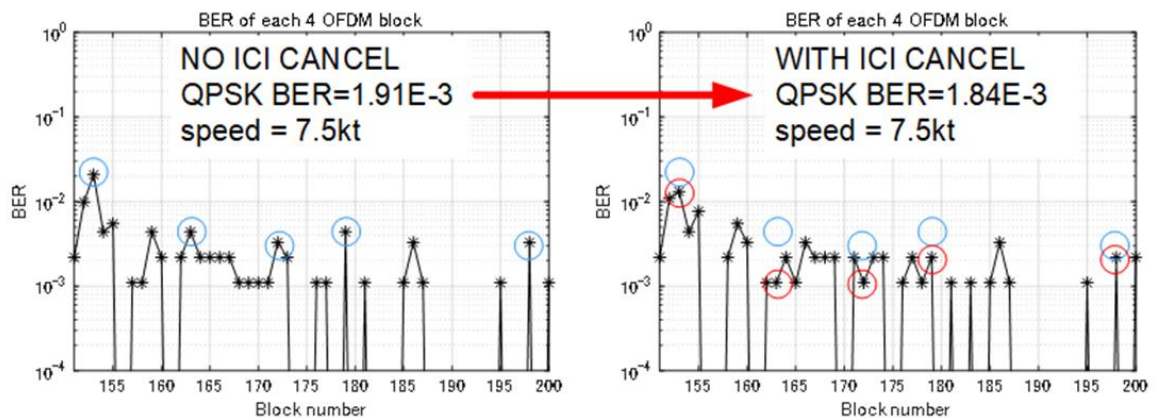


10sec, 400 OFDM symbols, TX Ship Speed  $v=1\text{m/sec}$ ,  $x(t=0)=-10\text{m}$ , offset=9m, RX Depth B= 20m (Test17)

21

Slide21

# 船速度: 7.5 knots



5sec, 200 OFDM symbols, TX Ship Speed  $v=3.8\text{m/sec}$ ,  $x(t=0)=+30\text{m}$ , offset=13m, RX Depth B= 20m (Test11)

22

Slide22

# アウトライン

1. 研究目的・背景
2. 水中OFDM通信システムアーキテクチャ
3. プール実験結果
4. 海洋実験結果
5. 結論

23

Slide23

# 結論

- マルチパスドップラー環境での、OFDM水中通信でのエラー低減を目的
  - ✓修正型遅延ドップラープロファイラー(mDDP)により、各遅延波のパラメータを推定し、キャリア間干渉ICIを推定し、逆処理によりICIをキャンセルすることを提案
- プロトタイプシステムを構築し、プール実験と海洋実験を実施
- プール実験では
  - 64QAM, RX depth=1.8m, BER値およそ半減(0.00636 to 0.00291)
  - 16QAM, RX depth=1.8m, BER値低減(from 0.0001 to free)
- 海洋実験では
  - 移動する船の大きなバックグラウンドノイズ条件ではあるが、ある程度のBERの低減が観察された

24

Slide24