

先端情報工学概論（3）

海洋開発と海洋通信開発
—水中OFDM通信システム開発—

ファイヤー和田 知久

wada@ie.u-ryukyu.ac.jp

琉球大学・工学部・情報工学科 教授


<http://www.ie.u-ryukyu.ac.jp/~wada>

2017年9月に沖縄近海で大規模採掘！

(098)894-6070 [FAX] (098)894-6078
 情報提供 編集部(098)82-1738

TV観和プラザ1階
 FAX (098)875-5303
 news@shimbun-online.com/
 com/

10円 1部 90円




八重山日報

THE YAEYAMA NIPPO 第13544号 沖縄本島版

2017年(平成29年)
 9月27日水曜日
 旧8月8日・先負

発行所 八重山日報社
 〒907-0023 沖縄県石垣市字石垣159
 電話:(0980)82-2403(代表)
 E-mail:nippo-j@aito.ocn.ne.jp



沖縄近海

海底熱水鉱床には垂る。今年8月中旬より9月、鉛のほか、金や銅など、沖縄近海に投入した資源が含まれていた。採掘機で海底約1600

海底鉱物、世界初大量採掘

資源の国内供給源期待

経済産業省と石油天然ガス・金属鉱物資源機構(JOGMEC)は26日、沖縄近海で、海底にある鉱物資源を船で大量採掘することに世界で初めて成功したと発表した。沖縄近海では海底から熱水と一緒に噴き出した金属が堆積してできる「海底熱水鉱床」の存在が相次いで確認されており、2020年代半ばごろの商用化を目指す。沖縄近海などに分布する海底熱水鉱床は、日本固有の資源で、同省は「これらの開発が可能になれば、鉱物資源の大部分を海外に依存している日本にとって、資源の新たな国内供給源として期待される」としている。

0以上の鉱床を細かく砕き、ポンプで海水とともに船に吸い上げる方式で試験を実施して成功した。今回採掘した鉱床には日本の年間使用量に相当する亜鉛が存在すると分析しているという。

沖縄近海の排他的経済水域(EEZ)内では過去3年間で6カ所の鉱床が見つかった。今後、新たな鉱床が発見される可能性が高い。

日本は鉱物を輸入に頼っており、同省は「生産性の高い採掘方法を確立し、十分な埋蔵量が確認できれば資源産出国になれる可能性がある」と期待している。18年度に経済性評価を実施する予定

沖縄近海で、船から海中に投入される採掘機「資源エネルギー庁提供」

定。

同省は海洋基本計画を2018年4月に閣議決定。同年12月に策定した「海洋エネルギー・資源開発計画」に基づき、日本周辺海域での海底熱水鉱床の資源調査、生産技術に関する基礎的な研究・調査を

小池新

衆院

東京都の小池百合子氏が率いる新党「希望」の参加メンバー日前、東京都内の記者会見する。小池氏や国会議員程度が出席し「寛容革保守政党を目指す」明記した党綱領を明らかにする予定。安倍晋三が28日召集の臨時閣議に衆院を解散する式表明したのを受け、公明同党は政権の策定作業を本格化した。民進党は与党とならざるに埋没しない警戒感を強め、部会合で対応を協



背景

- 周囲を海に囲まれた日本の発展にとって海洋開発が果たす役割は大きくなってきている
 - 日本の排他的経済水域（EEZ）の面積は約405万km²と陸部の10倍近く世界第6位の面積（含：接続水域）
 - 日本近海での海底熱水鉱床の発見
 - 沖縄本島北西沖の伊平屋小海嶺周辺に海底熱水鉱床を発見（平成26年12月報道発表）
 - 伊平屋島沖と久米島沖の海底で海底熱水鉱床を新たに発見したと発表（平成28年2月報道発表）
 - 海洋レジャー産業における安全確保
 - 海産物の高密度な生産



海上保安庁HP 管轄海域情報～日本の領海～

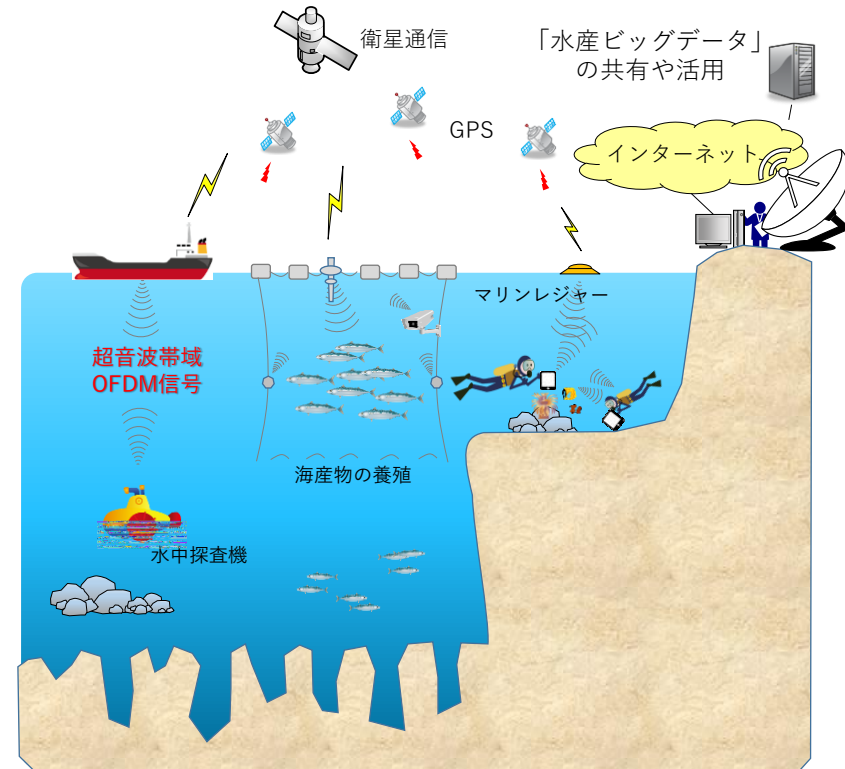
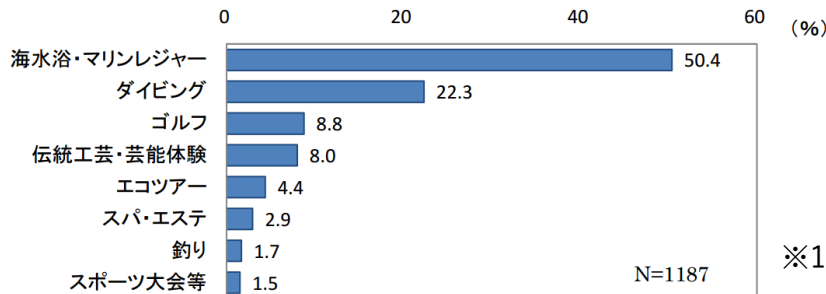
海底資源探査・レジャー産業の動向

海底資源の効率的な調査・探査

- 久米島沖など各地の熱水鉱床で銅・鉛・亜鉛・金・銀などの金属やレアメタルを含む熱水が噴き出し、**含有率の高い良質な鉱床**が存在していることが確認された。
- ケーブルを用いた機器間通信の場合、**ROV等の機器**の動作範囲が制限されるなどの課題があった。

海洋レジャー産業における安全確保

- 観光立県沖縄ではダイビング等の**マリ**
ンレジャーを**安全に楽しむための環境**
の実現が重要。

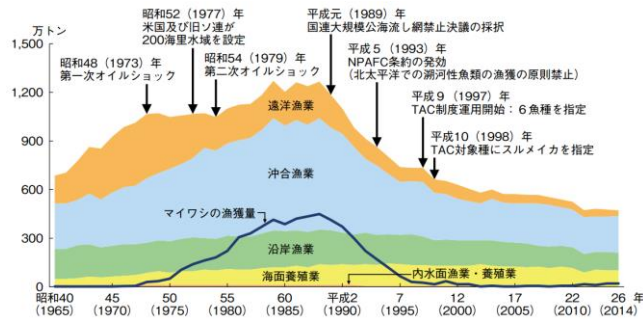


※1 沖縄での最も印象に残った体験活動
(平成24年度観光統計実態調査
平成25年 沖縄県文化観光スポーツ部)

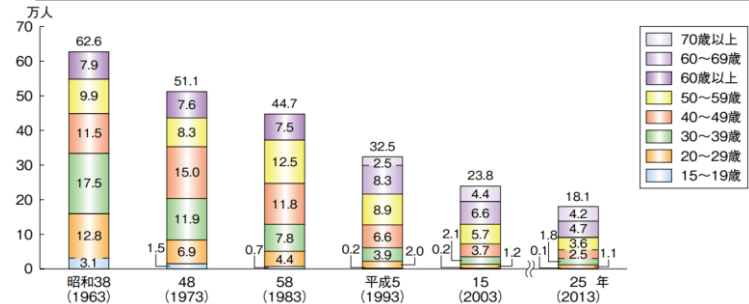
海産物生産の状況の変化

海産物の高密度な生産

- ☞ 漁業生産量と就業者数の減少。
- ☞ 養殖による高密度な生産への期待。
- ☞ 対象となる海域の詳細なモニタリングが必要不可欠。
 - 残餌（餌の食べ残し）、赤潮、等
- ☞ 水中IoTの実現でセンサによる常時モニタリングと、水中ロボットによる低コストで効率的なデータ収集。
- ☞ 「水産ビッグデータ」の共有や活用で低廉・効率的な漁業を実現



部門別漁業生産量の推移と漁業を取り巻く状況の変化



漁業就業者数の長期的な推移 (平成27年度 水産白書より)

OFDM水中音響通信技術概要

■ 水中では音波が有効

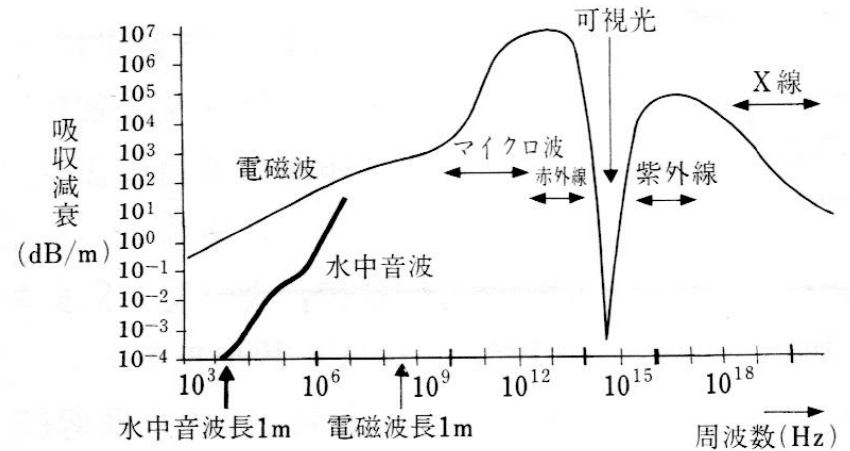
- ・ 光や電磁波は減衰率が高く透過しにくい。
- ・ 音波は非常に**良好な透過性**を持っている。

■ OFDMの概要

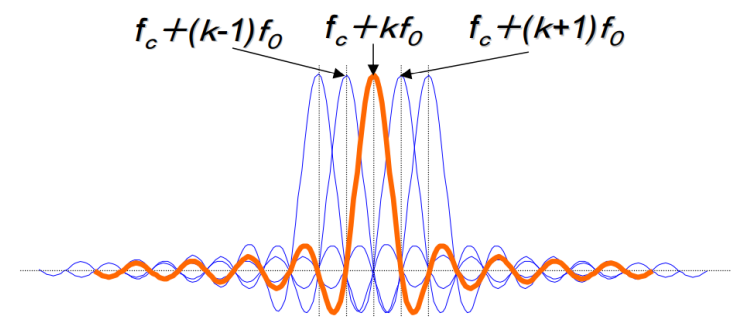
- ・ **地デジ**や携帯電話（LTE）、IEEE 802.11a/gといった**無線LAN**などで採用されている**高速伝送技術**。
- ・ 多数の直交するキャリア信号を多重化するデジタル変調方式。

■ ダイバーシチ合成による受信特性の改善

- ・ 複数の受信トランスデューサを使用した**ダイバーシチ合成**により**受信特性を改善**。



電磁波と音波の海中での吸収減衰率の周波数特性
(海洋音響の基礎と応用 (成山堂書店、2004))



OFDMスペクトラム
(デジタル無線通信の基礎からOFDM入門まで
琉球大学 工学部 情報工学科 和田 知久)

これまでと現在の研究内容（琉球大学と沖縄高専）

平成25年度～26年度

浅海域向け単方向通信の伝送方式の研究開発

- 戦略的情報通信研究開発推進事業（SCOPE）地域ICT 振興型研究開発採択課題
- 超音波帯域の周波数を利用したOFDM通信の有効性を確認
- 鉄砲エビや海洋生物に起因するインパルスノイズ対策によるビットエラー率の改善
- ダイバーシチ技術の適用による通信品質を改善
- 移動速度1knot時にQPSK/16QAM/64QAMの全変調の試験においてエラーフリーの通信を実現

平成28年度～

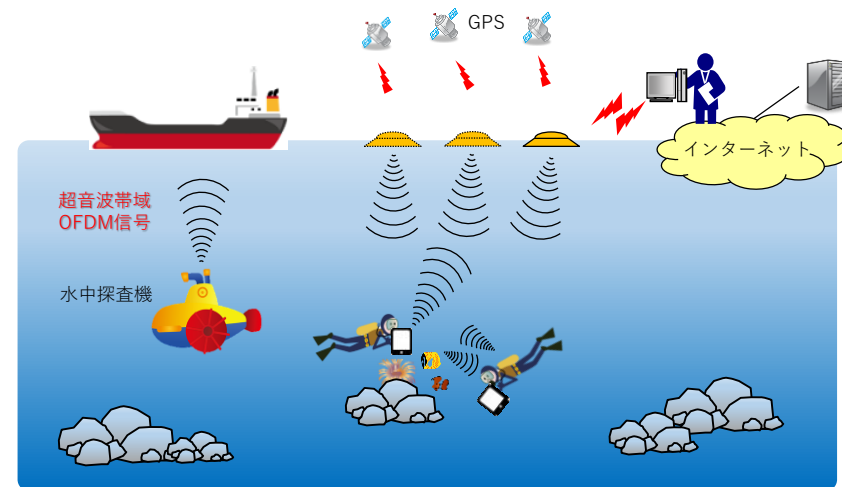
双方向通信・複数端末サポートによる海中無線通信 エリアの構築

戦略的情報通信研究開発推進事業（SCOPE）
地域ICT 振興型研究開発採択課題

平成27年度～

深海から海面母船通信用通信装置の研究開発

- オキシテック（株）との共同研究開発
- ドップラー効果などによる性能劣化を補正する方式を開発
- 企業との共同研究及び特許申請等、実用化に向けた展開



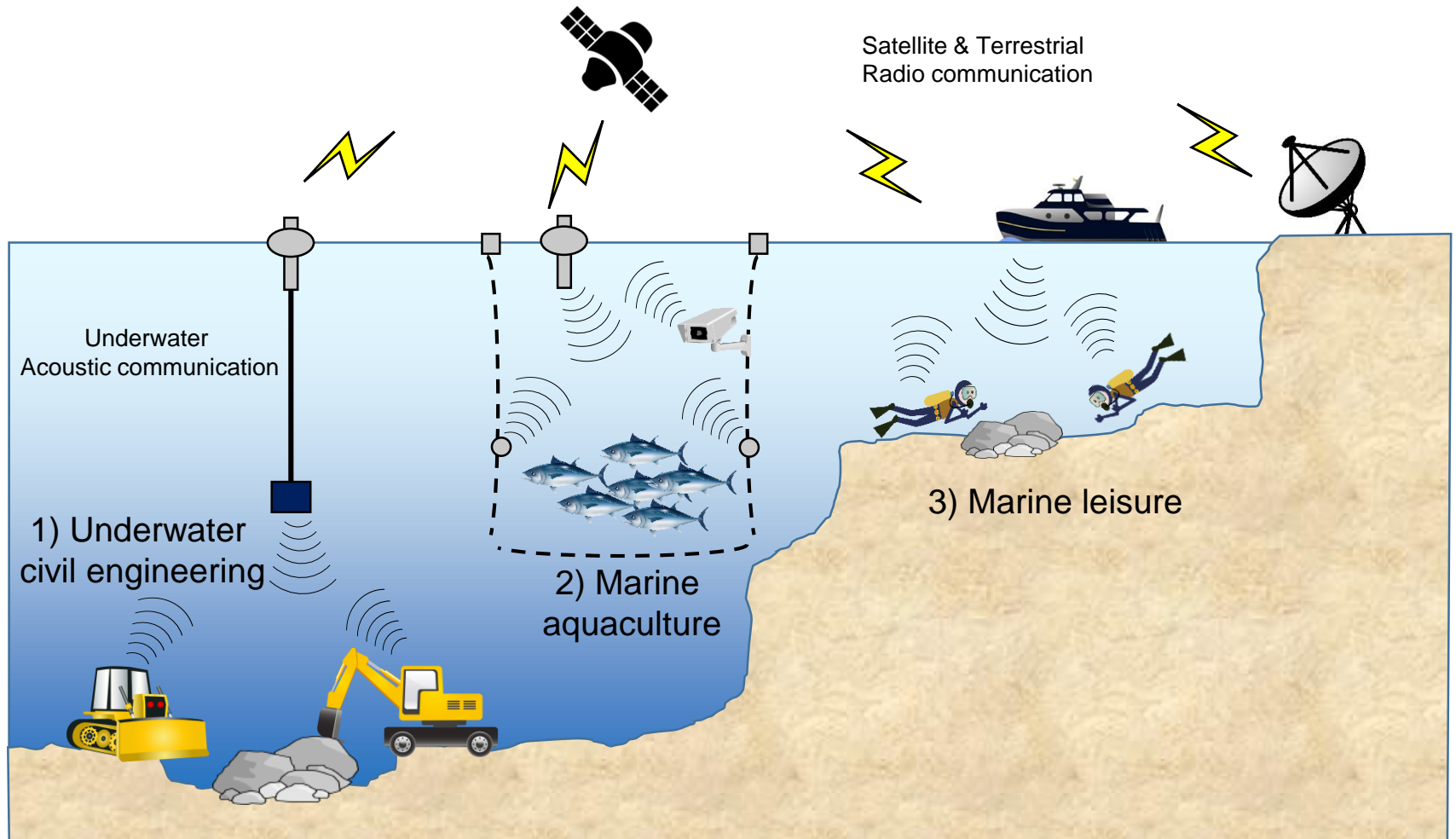
(1)

双方向通信・複数端末サポートによる海中無線通信エリアの構築

ターゲットアプリケーション

■ 海中での100m規模の小エリアの海中無線通信エリアにより

1. 海中工事での映像等の確認
2. 養殖における自動化
3. マリンレジャーでの安全確保



水中小規模ネットワーク

- 海中で数百メートルエリアの無線通信
 - ✓ オニヒトデロボット等の無線コントロール（現状では有線）
 - ✓ レジャーダイビング等の安全確保



2017年度開発中システム

海中無線エリア

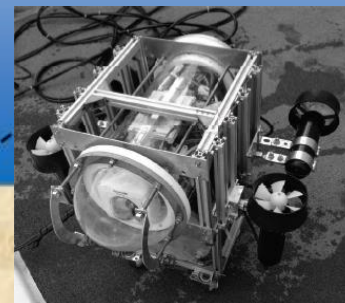
Up Link Down Link

80m

Multipath

100m

- TDD DL and UL
- Max 80m length
- Max 8m major multipath delay

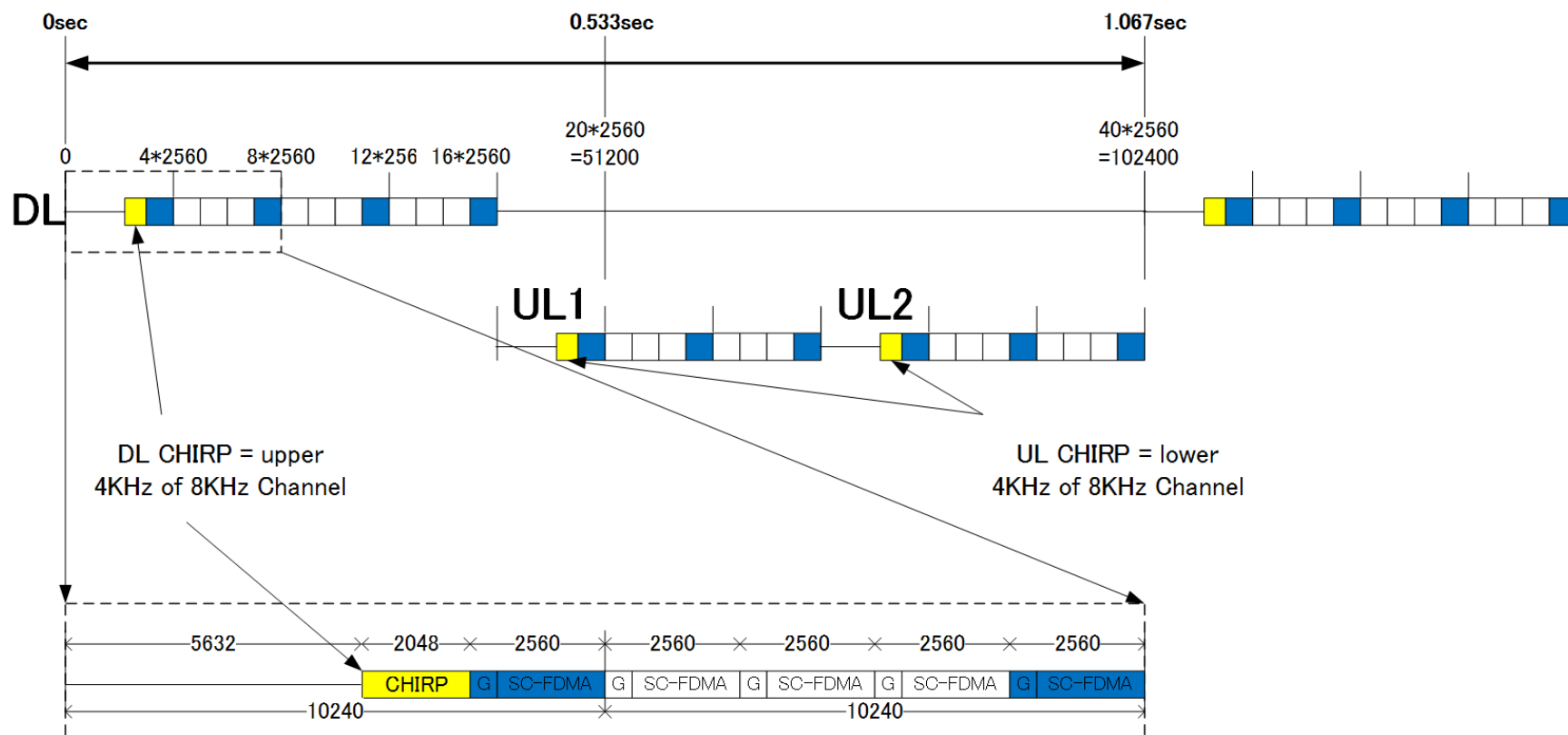


沖縄高専機械システム

プロトタイプデザイン (1)

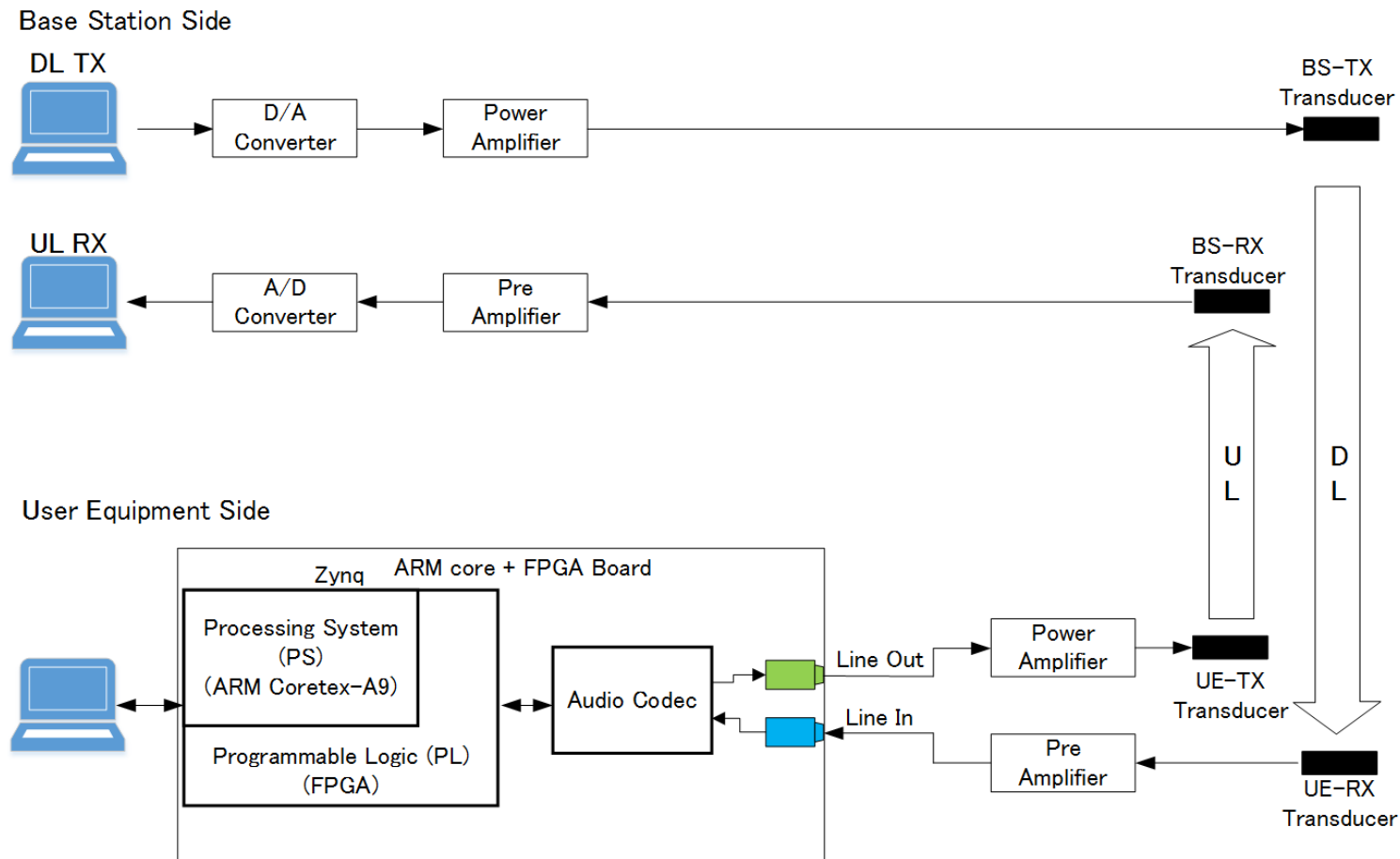
- 基地局1台、複数端末を想定
- LTEのような繰り返しフレーム
 1. ダウンリンク部分
 2. アップリンク部を複数端末でシェア

$F_s=96\text{KHz}$



プロトタイプデザイン (2)

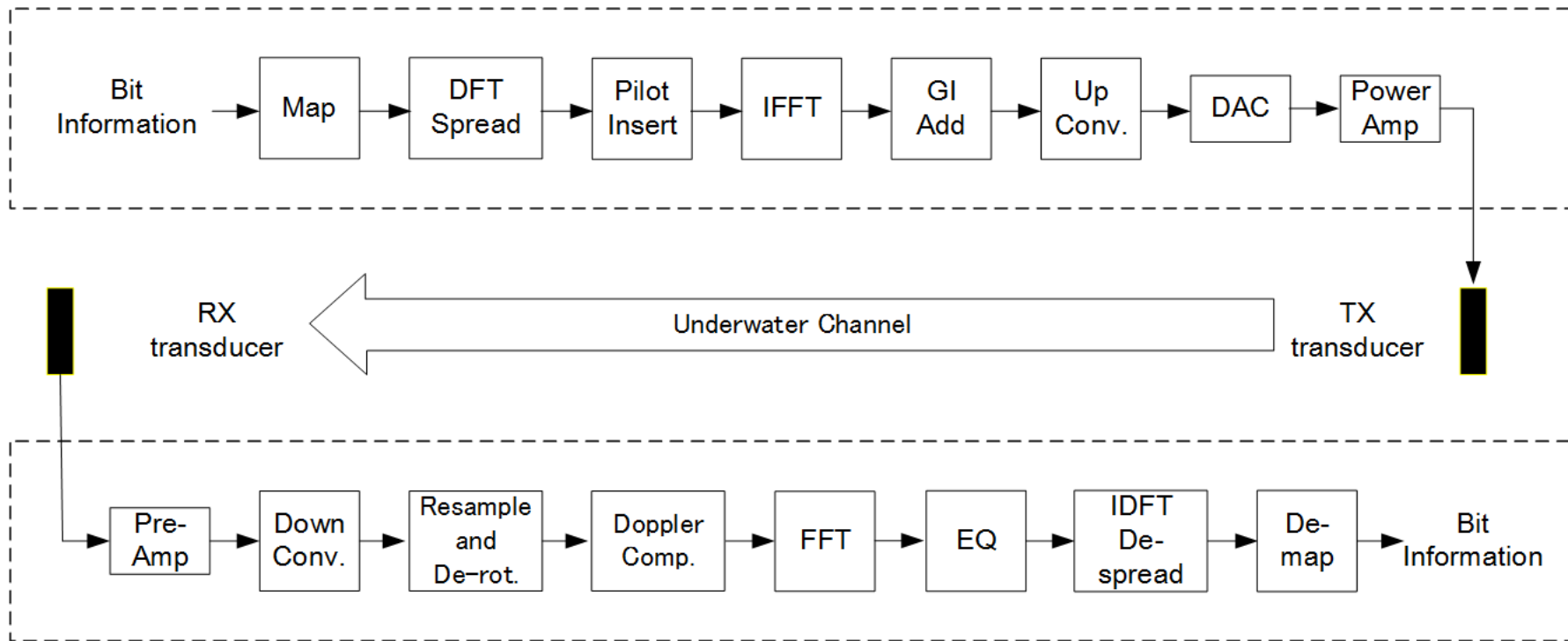
■ PC+MATLABと小型FPGAによるプロトタイプシステム構築



プロトタイプデザイン (3)

■ PC+MATLABと小型FPGAによるプロトタイプシステム構築

Transmitter TX side



Receiver RX side

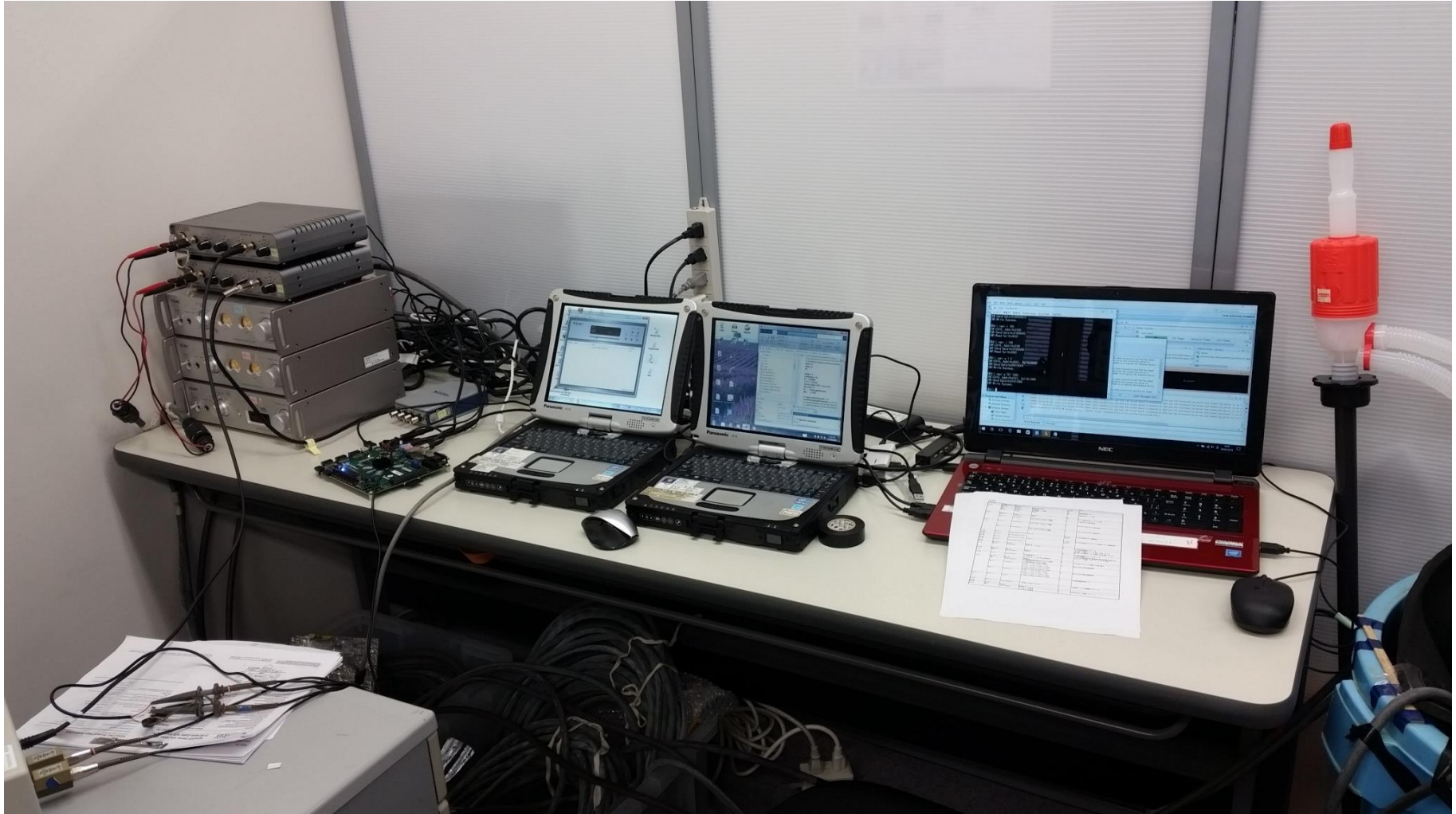
プロトタイプデザイン (4)

■ システムパラメータ

SC-FDM Parameters	Value
TX-RX Elements	1 TX and 1 RX Transducer
Sampling Frequency	96000 Hz
TX Center Frequency	20000 Hz
Band Width	8000 Hz
FFT Size	2048
OFDM symbol length T	21.333 ms (2048 points)
GI length T _g	5.333ms (512 points)
Effective Symbol length T _u =T+T _g	26.667ms (256 points)
Sub Carrier Spacing	46.875 Hz
Number of Sub Carrier	169
DFT precode size	84 for SP symbol and 156 for CP symbol
Pilot	Zadoff -Chu, N _{ZC} = 85 and 13
Data Rate	10.35Kbps (QPSK)

プロトタイプデザイン (5)

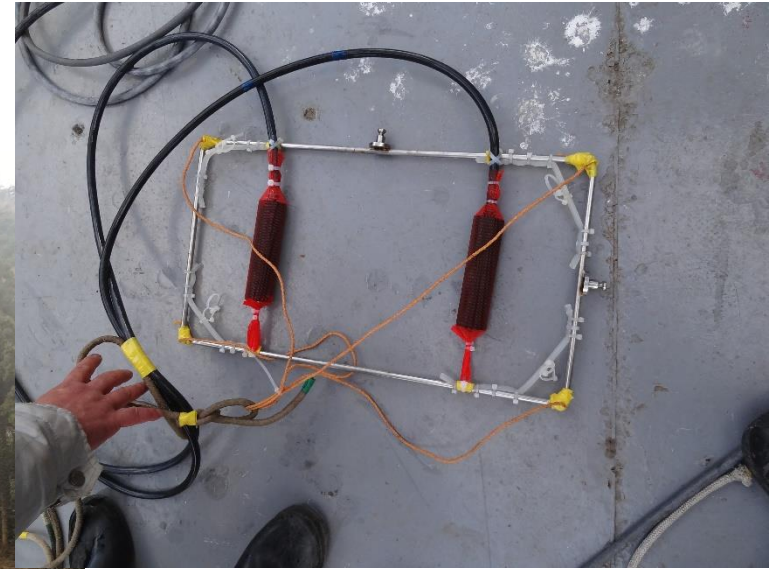
■ 実験室写真



プロトタイプデザイン (6)

基地局側

■ ダム湖実験写真



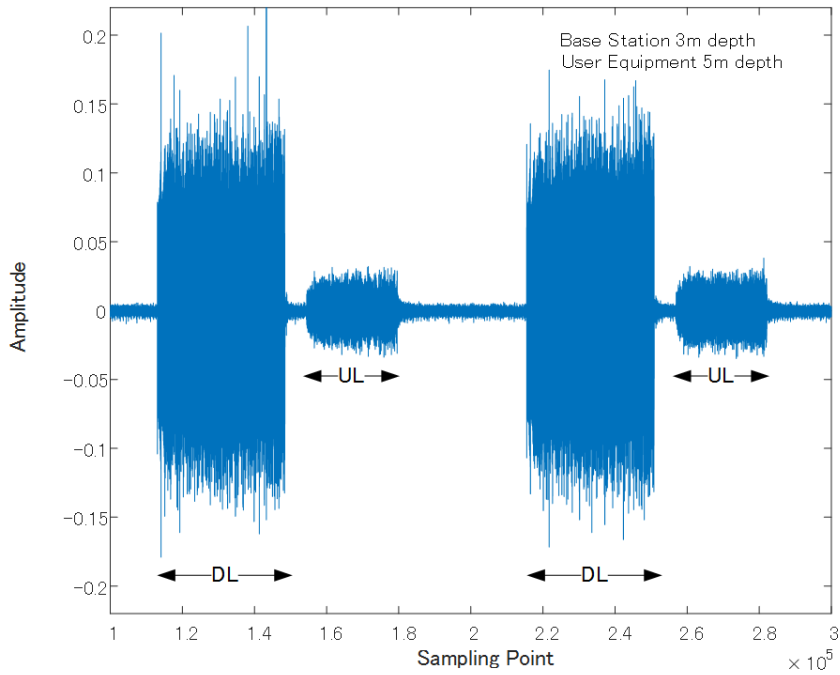
端末側



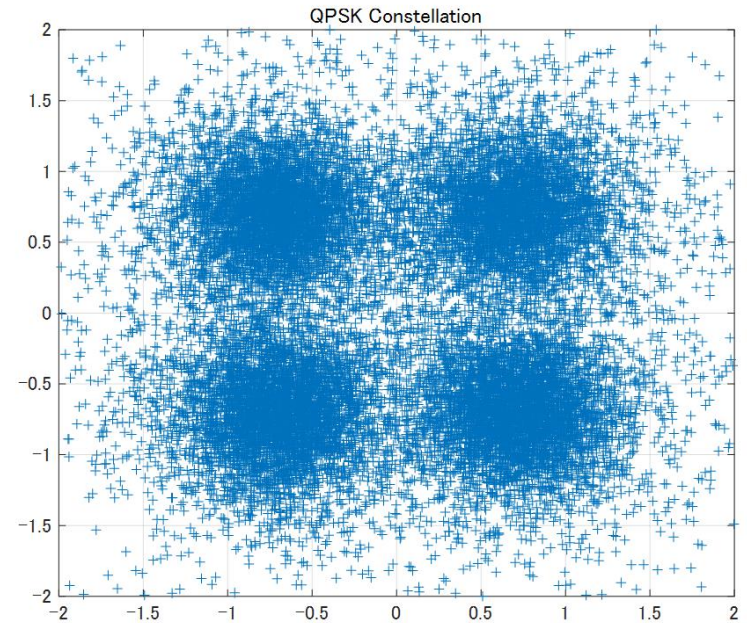
プロトタイプデザイン (7)

■ ダム湖測定データ

時間波形



ULコンスタレーション



(2)

深海から海面母船通信用通信装置の研究開発

MTS/IEEE OCEANS2016 presentation
“An Underwater Acoustic 64QAM OFDM
Communication System
with Robust Doppler Compensation”

Tomohisa Wada¹⁾, Taisaku Suzuki^{2&1)}, Hiromasa Yamada³⁾, Shigeo Nakagawa³⁾

1): Dept. of Information Engineering, University of the Ryukyus,

2): National Institute of Technology, Okinawa College,

3): Oki Seatec Co., Ltd.

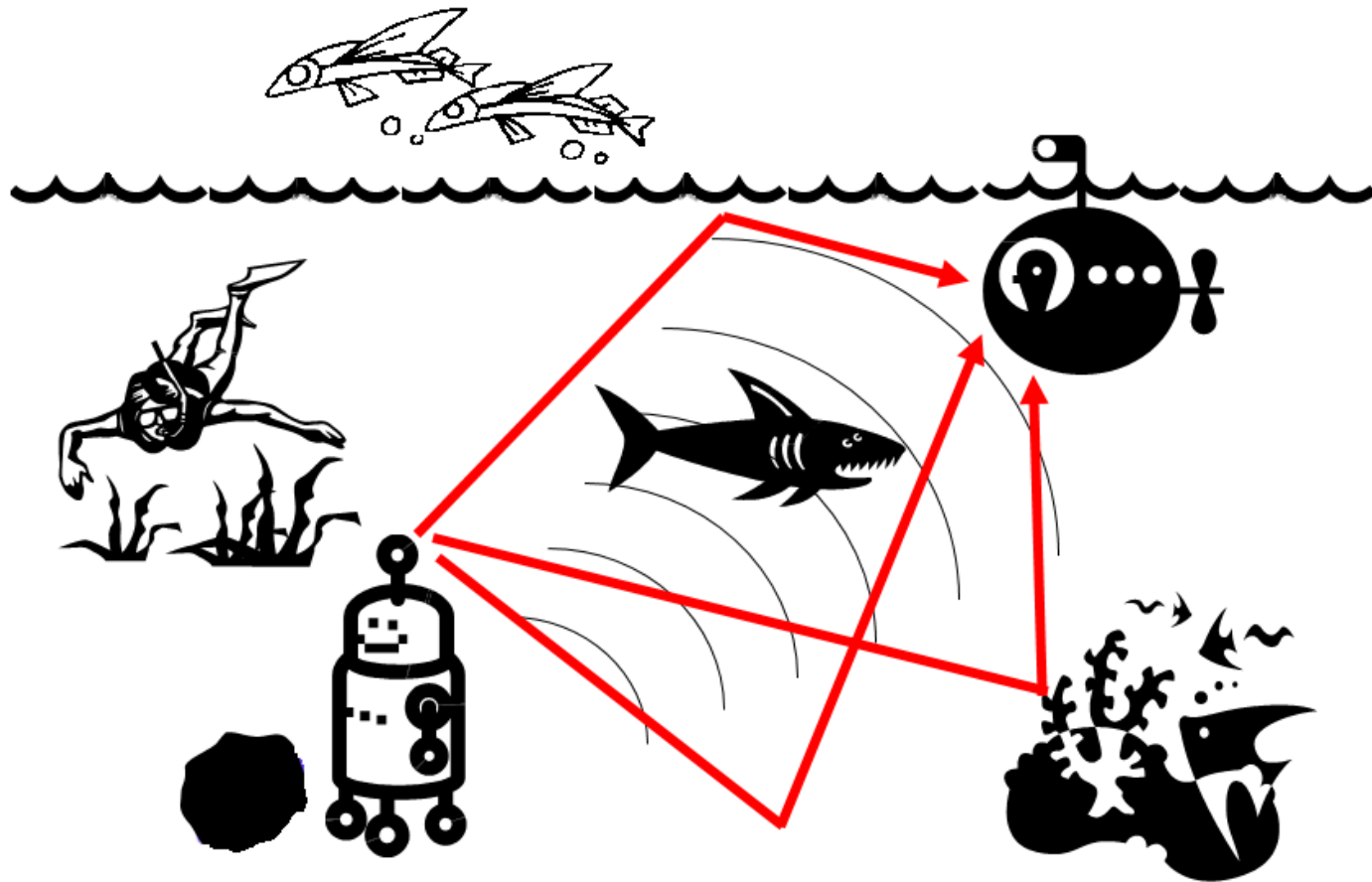
OUTLINE

- Backgrounds
- Proposed Communication System
- Burge Experimental Result
- Computer Simulation
- Deep Ocean Experimental Result
- Conclusion



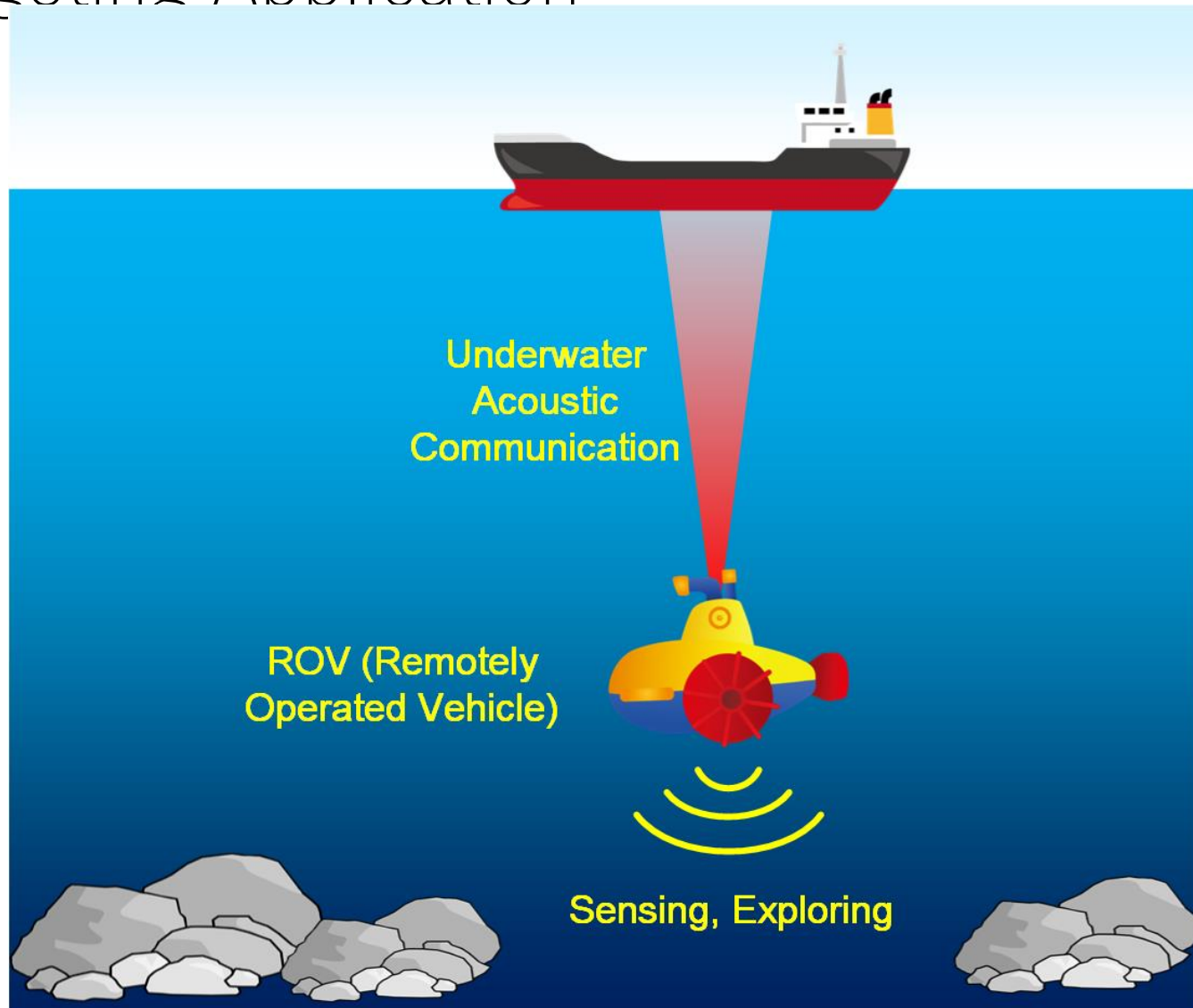
Backgrounds

Application example: underwater network



Remote robotic control by underwater acoustic communication with multipath channel

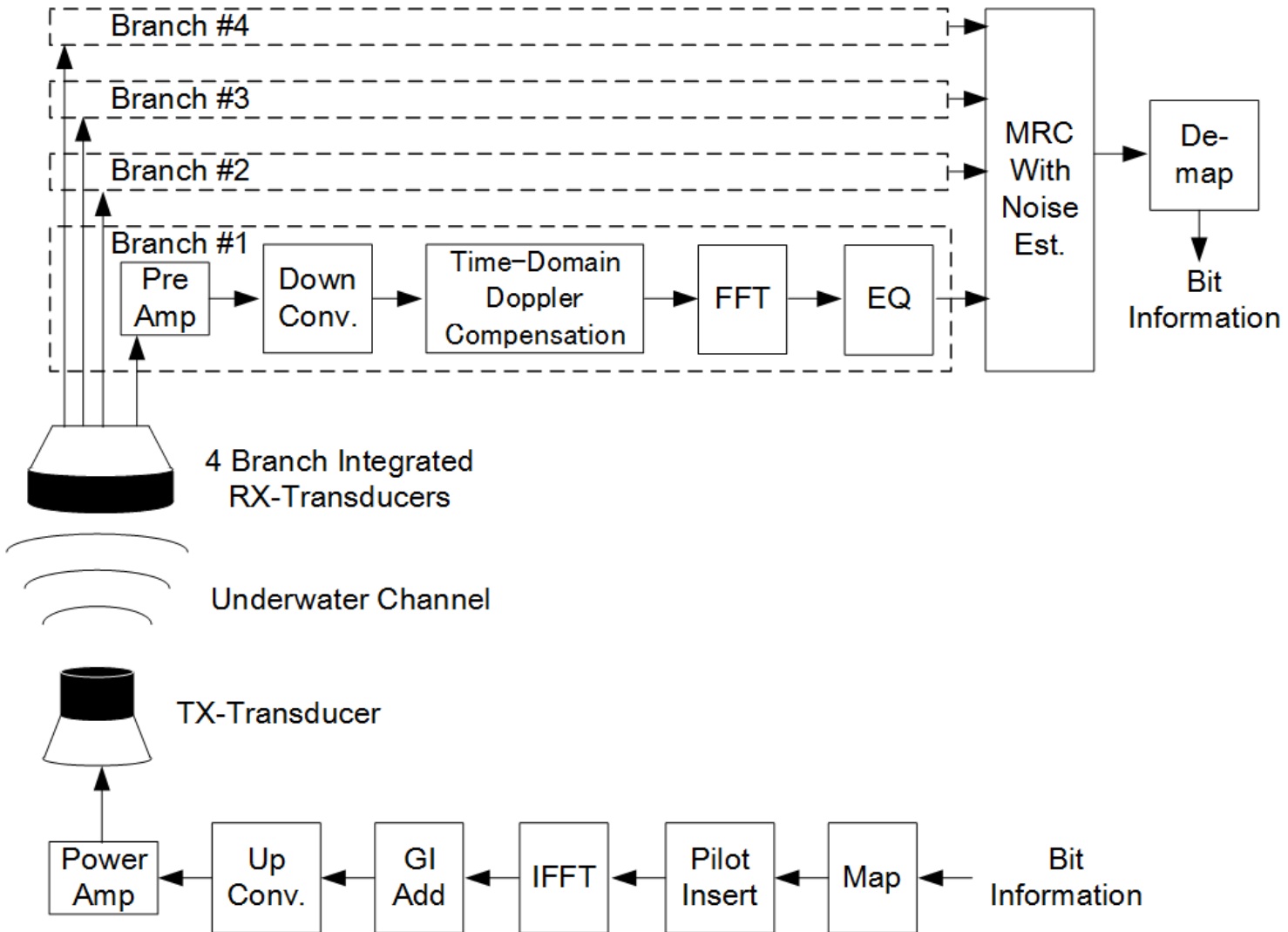
Targeting Application





Proposed Communication System

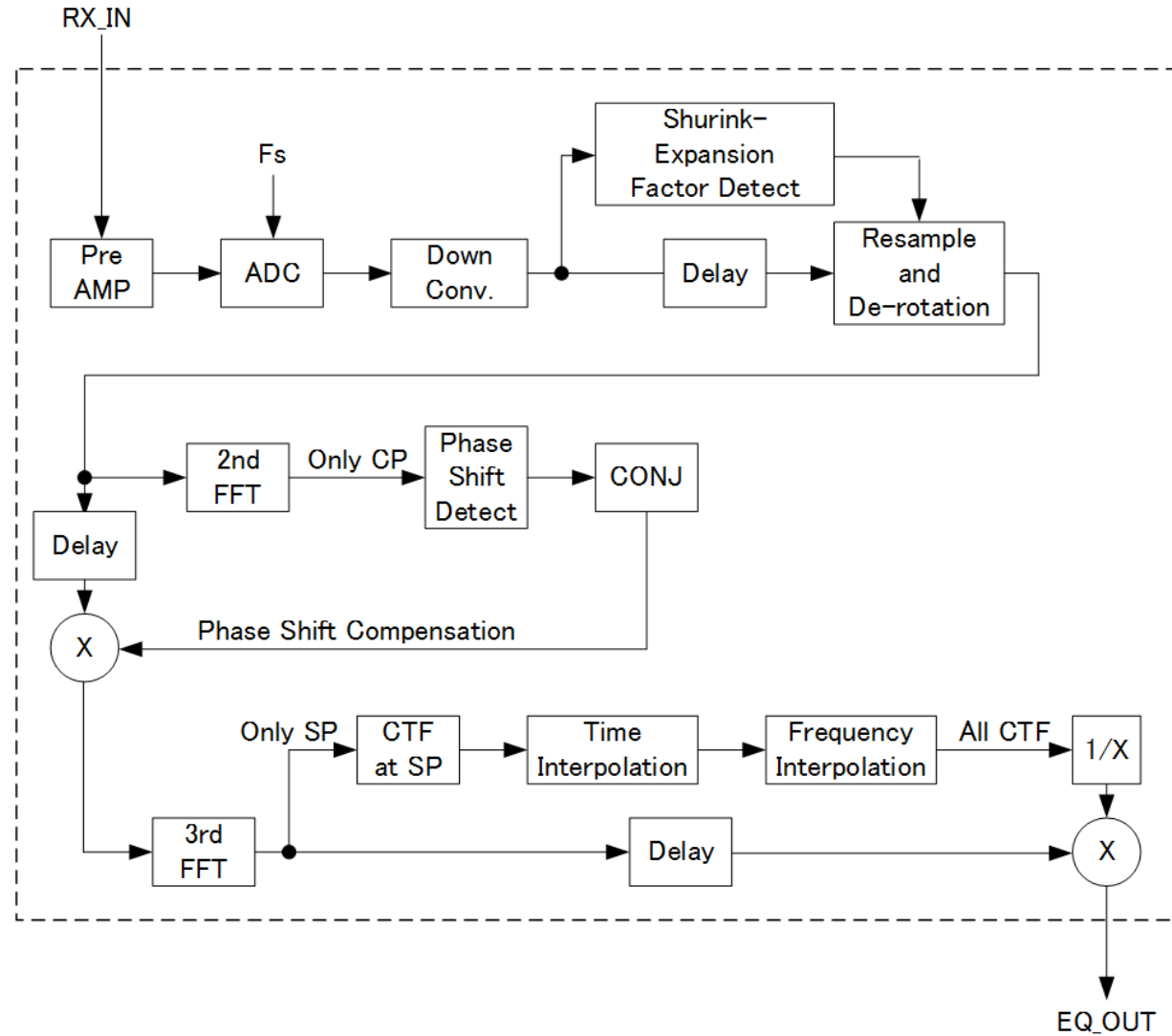
Proposed communication system



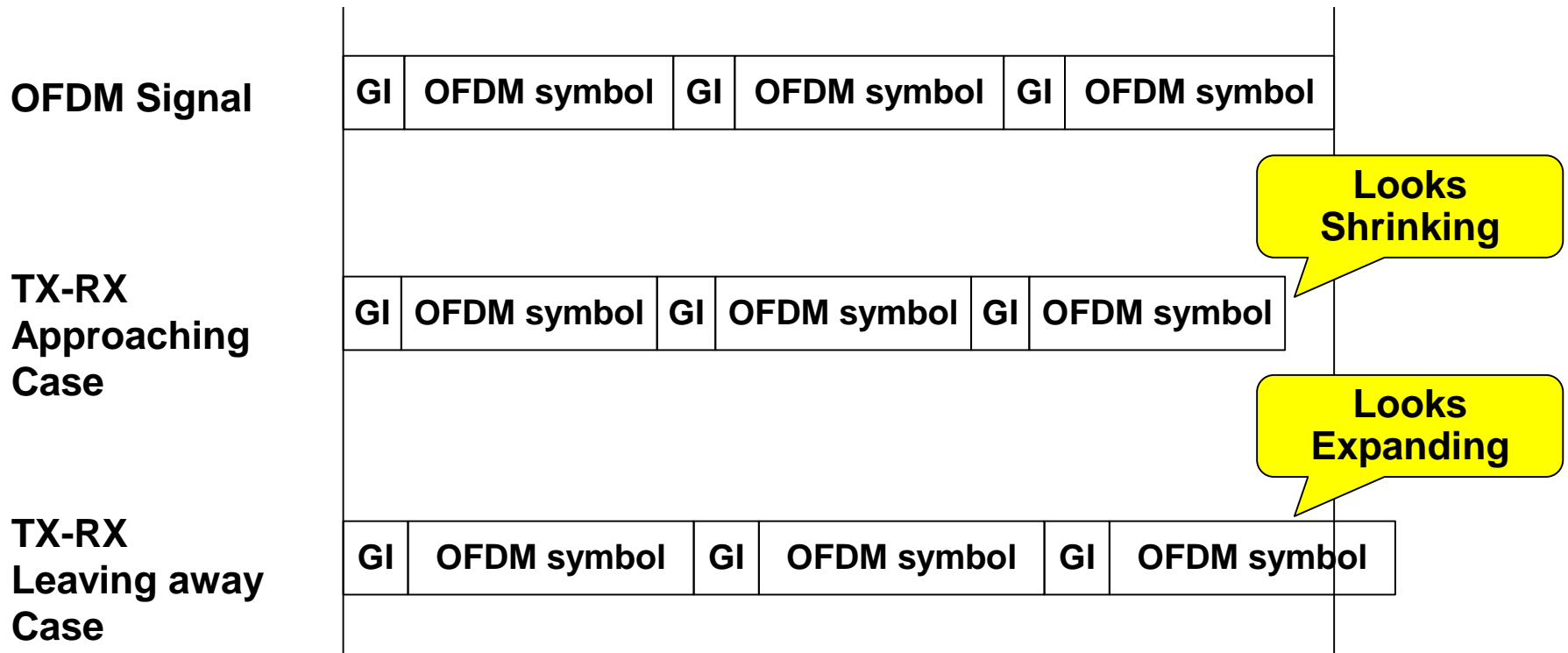
OFDM System Parameters

Parameters	Value
TX-RX Elements	1 TX and 4 RX Transducer
Sampling Frequency F_s	102.4 KHz
TX Center Frequency F_c	24000 Hz
Band Width	8000 Hz
FFT Size	1024
OFDM symbol length T	10.0 ms
GI length	2.8125 ms
Sub Carrier Spacing	100 Hz
Number of Sub Carrier	81
Average TX power	166dB
Max. Data Rate	27.5Kbps (64QAM)

Block diagram of 1 branch receiver



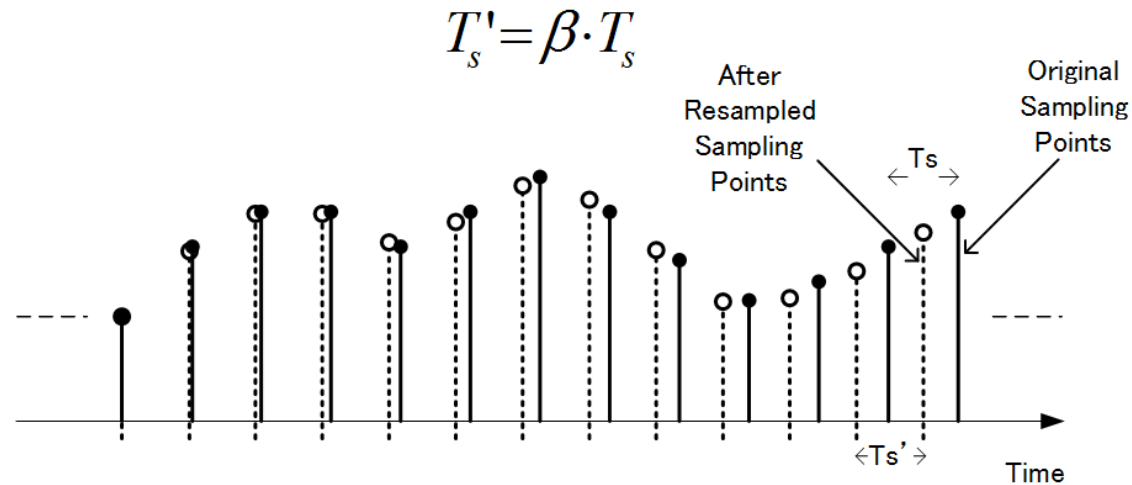
Signal Shrink or Expansion



Resample & De-rotation operation

1) Resample

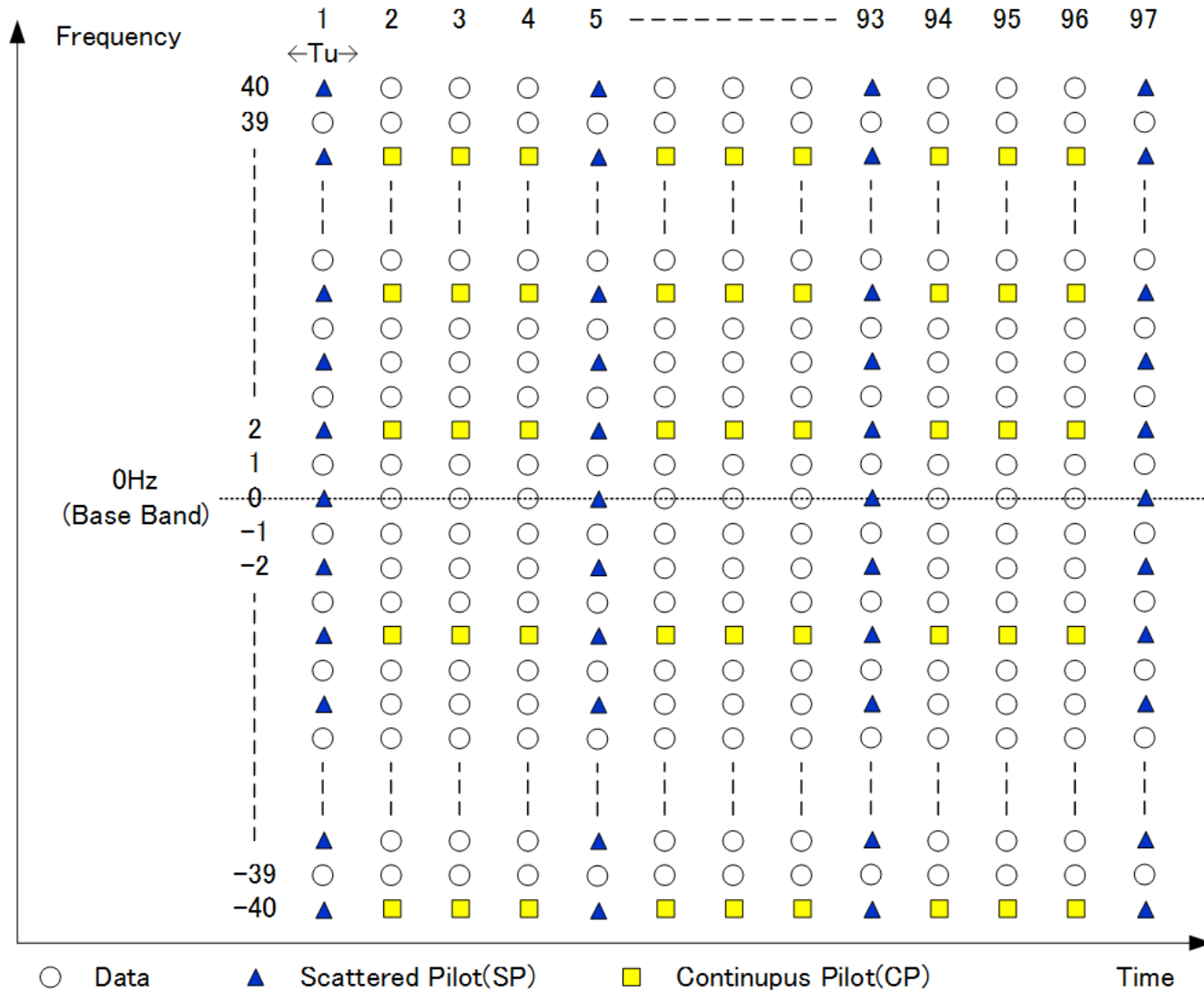
- T_s : Sampling interval of the system
- T_s' : Modified sampling interval



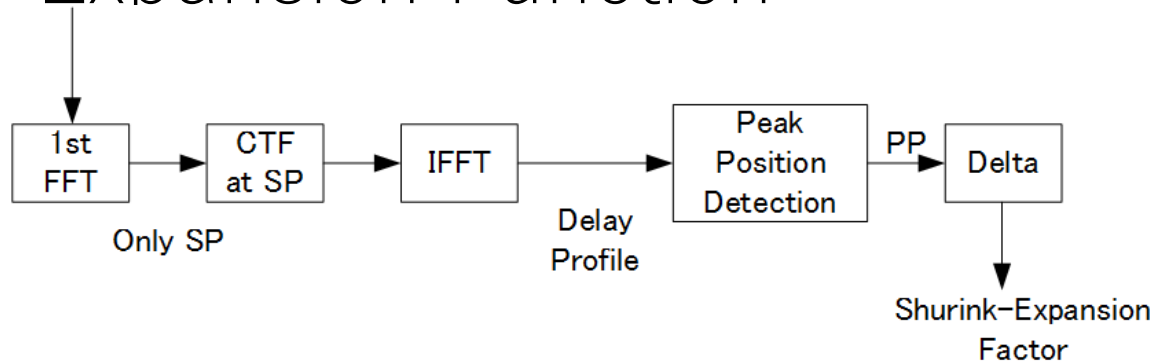
2) De-rotation

$$Diff = e^{-j2\pi f_c n (T_s - T_s')} = e^{-j2\pi f_c n T_s' (1 - \beta) / \beta}$$

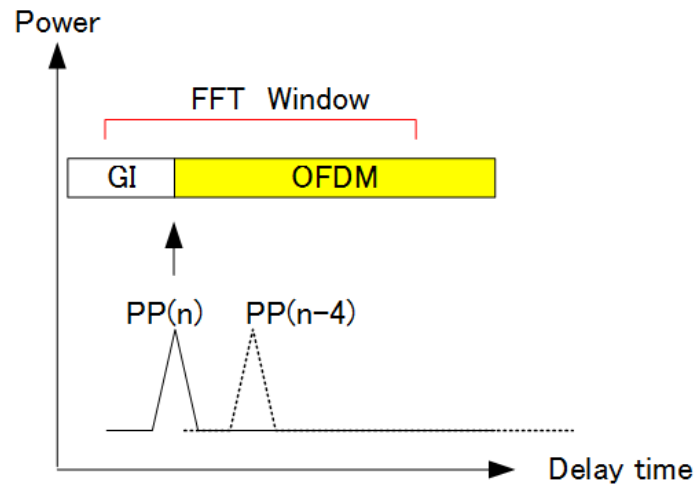
Time-Frequency diagram for OFDM



Shrink-Expansion Function



(a) Shurink-Expansion Factor Detector



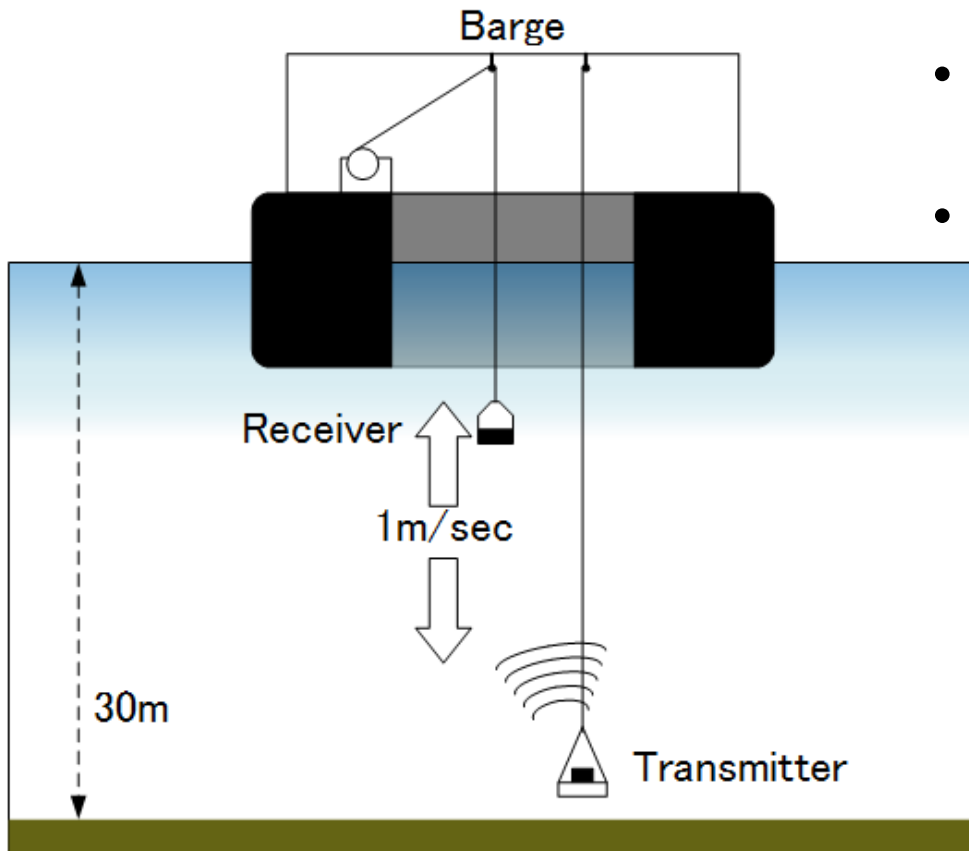
(b) Delay Profiles for symbol number n and $n-4$



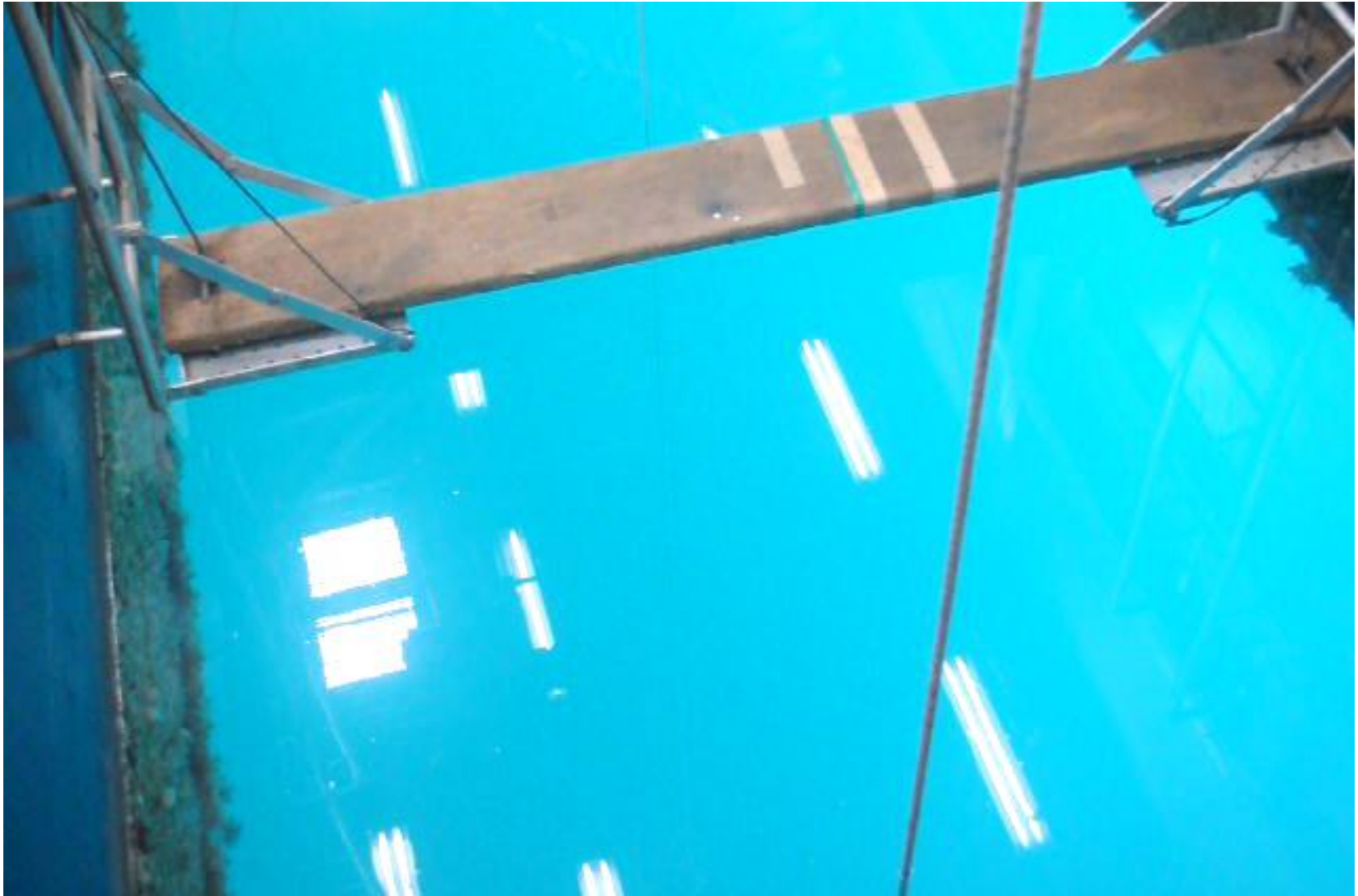
Burge Experimental Result

Burge Experiment Scene

- OKISEATECH Burge in Numazu, Shizuoka Prefecture
- 6m vertical move with 1m/sec
- Watch the Doppler Compensation effect in following movies.



Receiver Moving Video



Constellation w/o Dop.

Compensation

**When receiver stops,
Constellation gets clean!**



Constellation with Dop.

Compensation

**With Doppler Compensation,
Constellation always gets clean!**



64QAM with Dop. Compensation

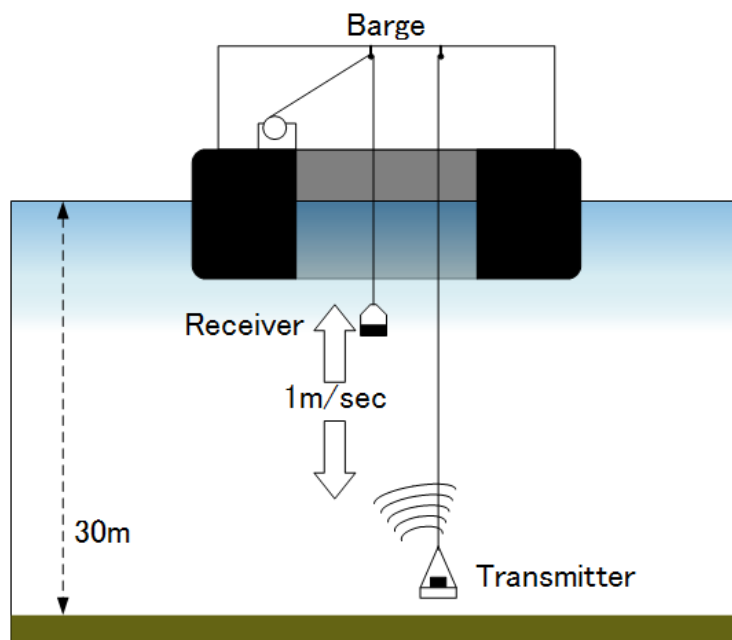
**With Doppler Compensation,
Constellation always gets clean!**



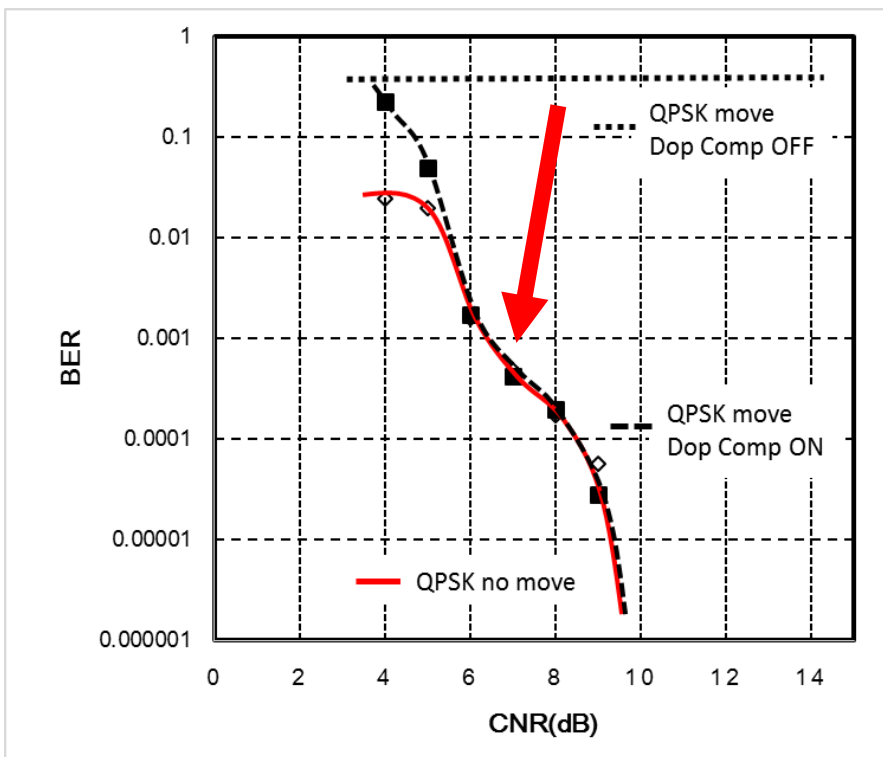


Computer Simulation

Simulation Results (1)



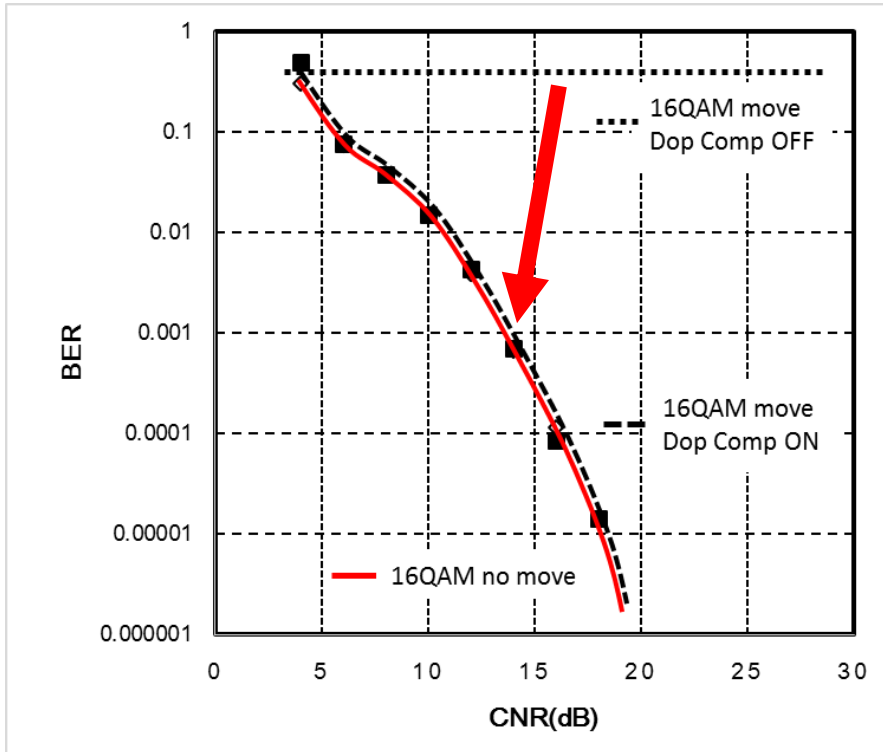
QPSK modulation



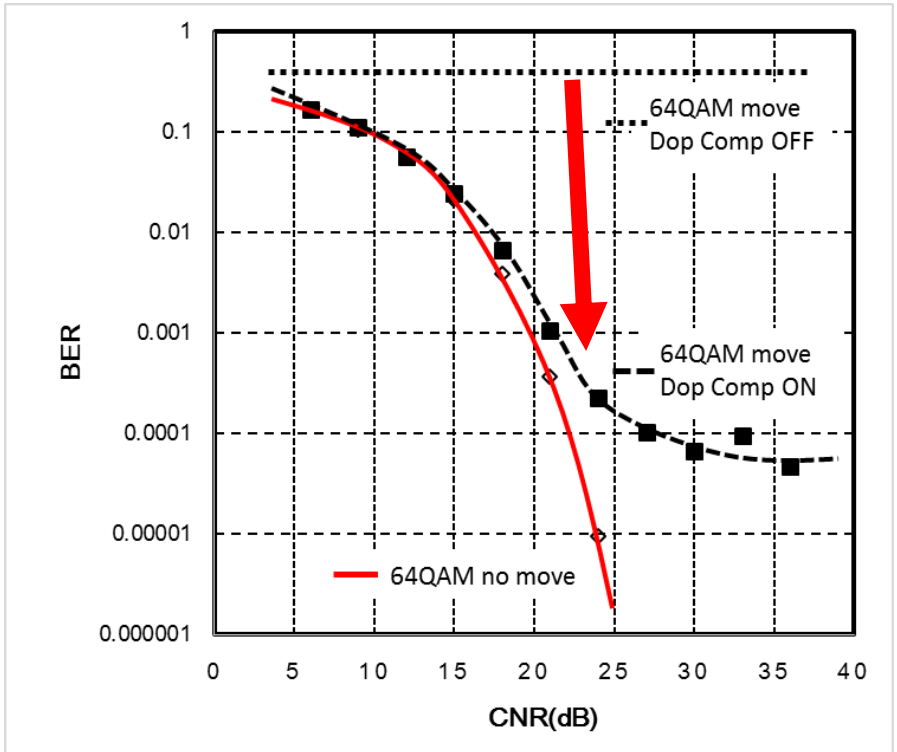
- Move case:
- $\Delta \text{Length} = 2 * \sin(2\pi/5 * t)$, m
- Max velocity = 2.5m/sec

Simulation Results (2)

16QAM



64QAM



In 64QAM case, the Doppler Compensation was not sufficient and error floor appears!

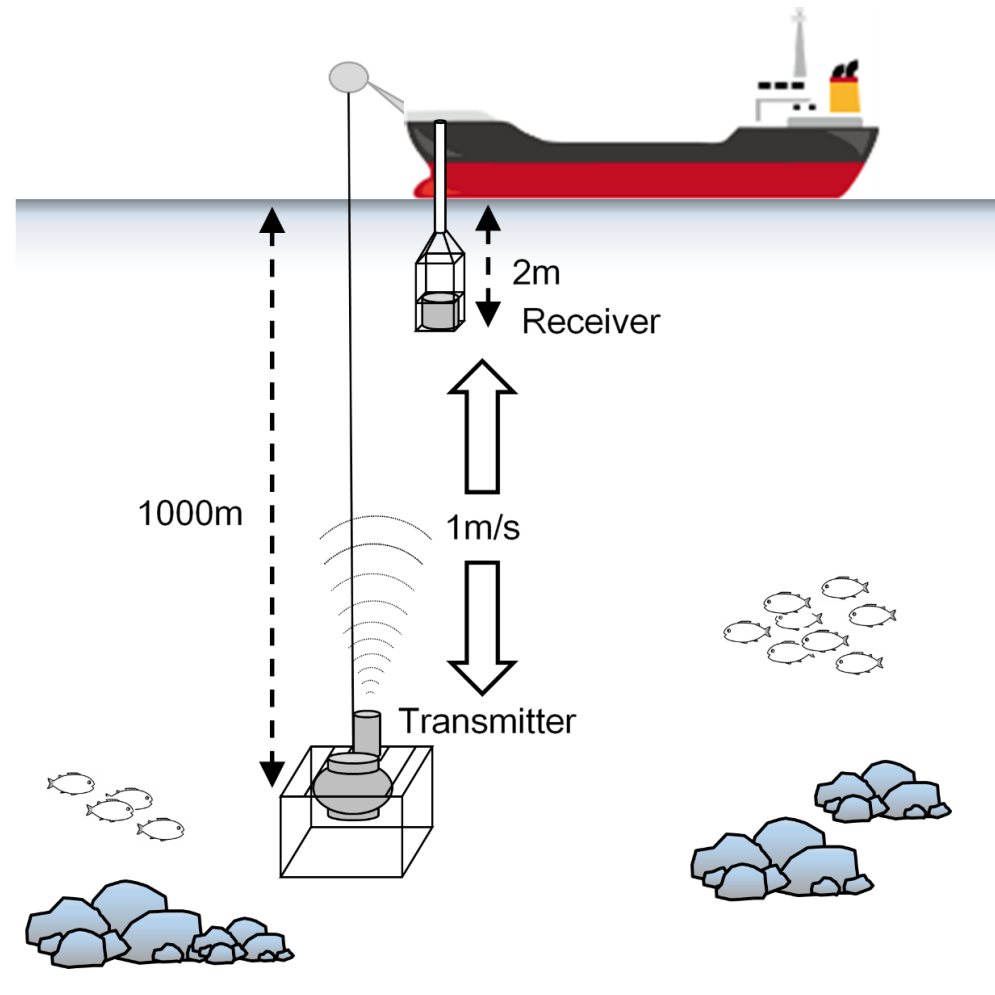


Deep Ocean Experimental Result

Ocean Experiment Site



1000m Vertical Transmission



TX Transducer and camera system

Transmitter

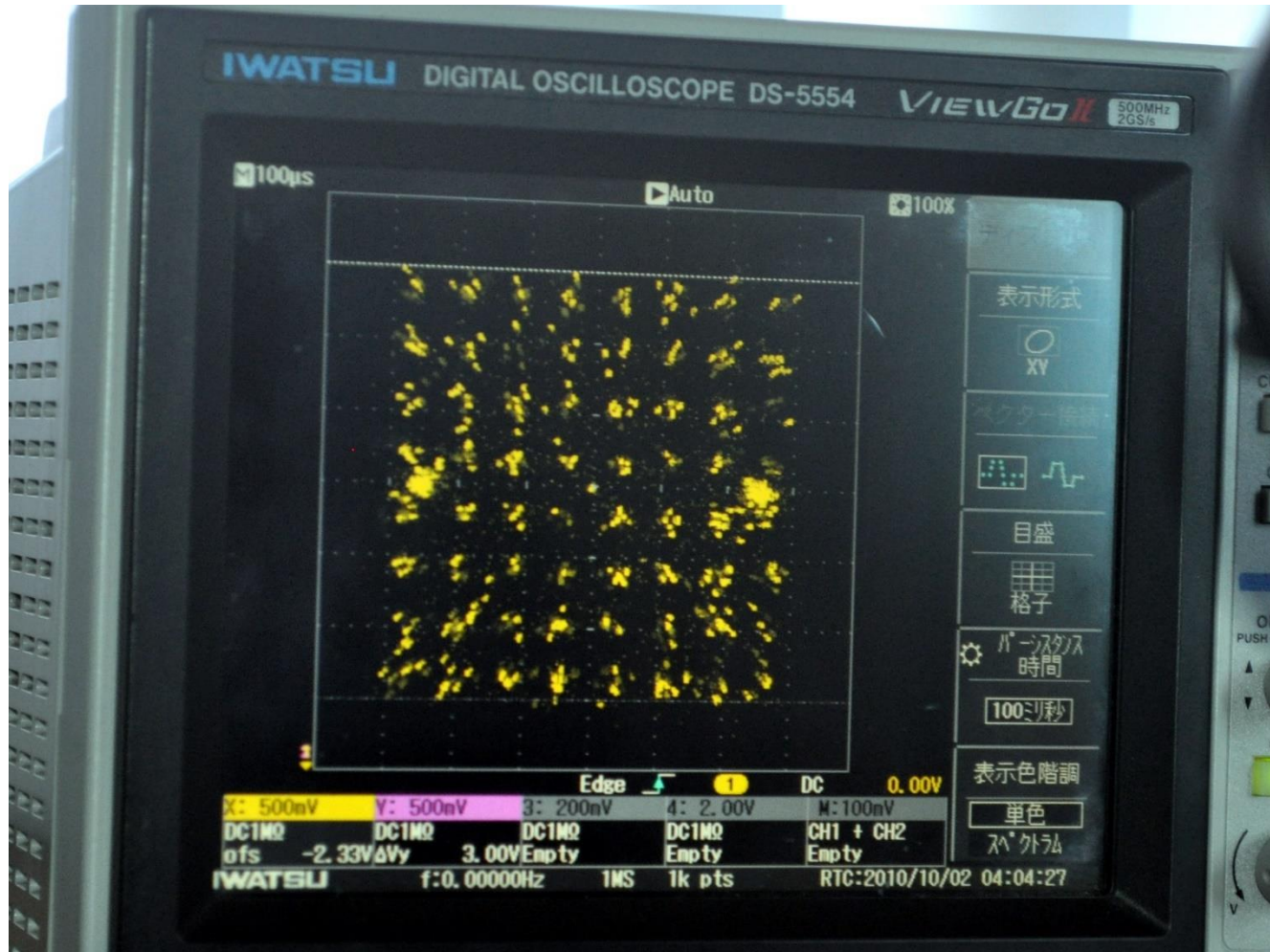
**Camera in
Red Cover
Facing
bottom**



4 branches Integrated Receiver



64QAM constellation at 1000m



Received image from 1000m

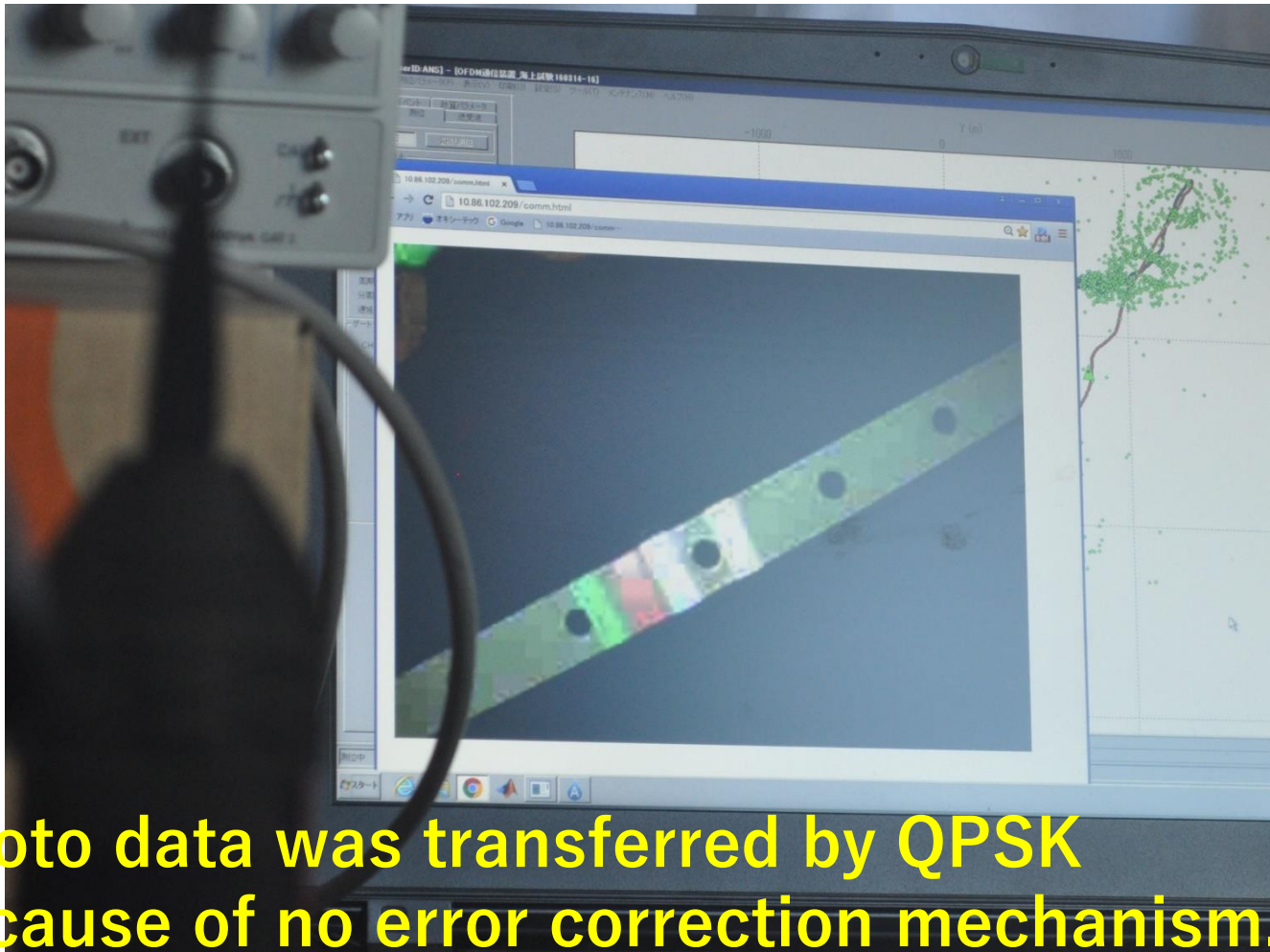
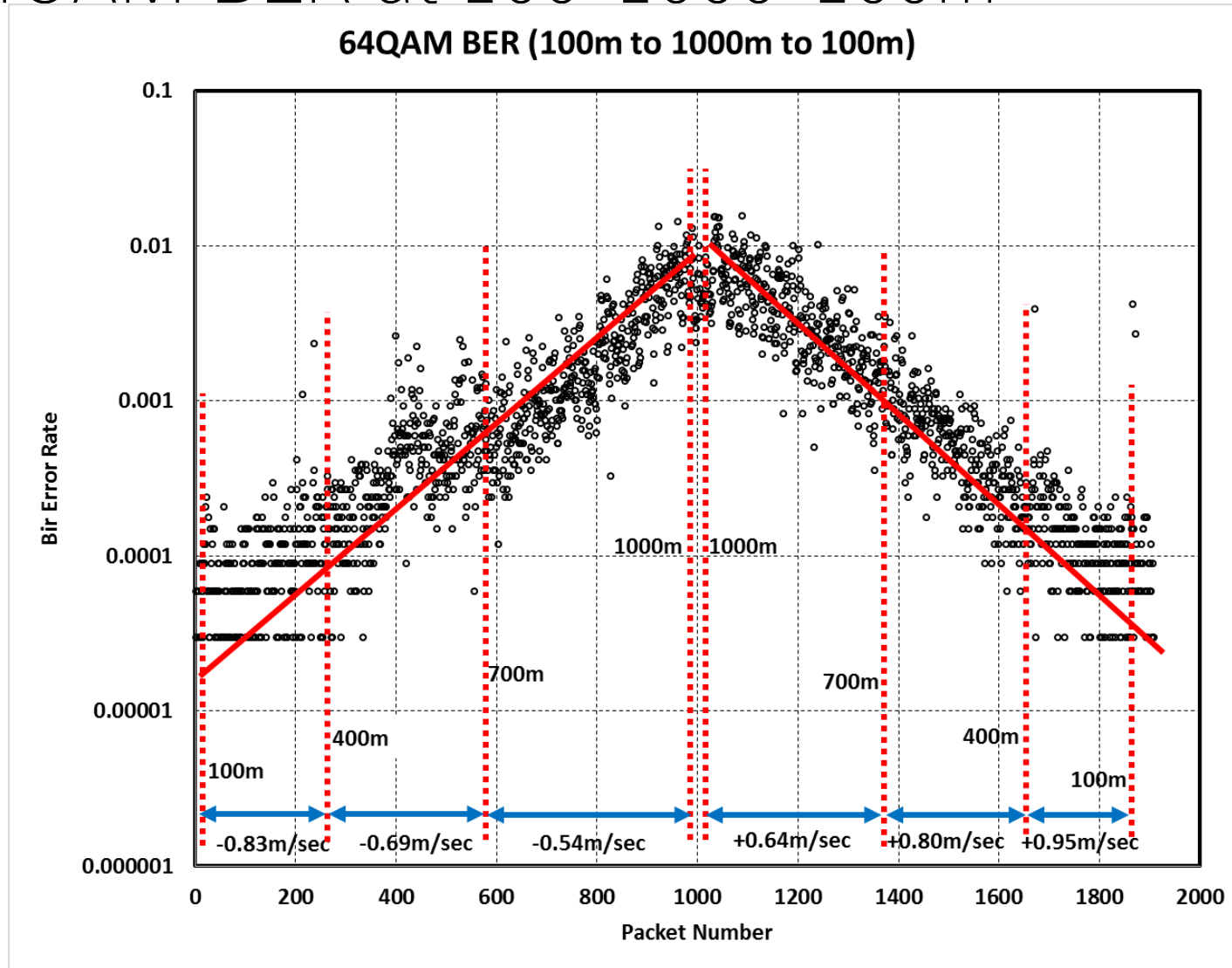


Photo data was transferred by QPSK because of no error correction mechanism.

64QAM BER at 100-1000-100m



Conclusion

- Underwater acoustic OFDM communication system with Robust Doppler Compensation
- Signal shrink-expansion processing and Doppler shift compensation capabilities
- Four OFDM receivers are combined by frequency domain diversity combiner with MRC
- 64QAM BER with depth of 1000m approximately less than $1E-2$ has been successfully obtained with 0.54-0.95 m/sec moving speed

MTS/IEEE OCEANS 2017, Anchorage Alaska USA, September 18-21nd 2017より

A 31.8kbps/8kHz Underwater Acoustic
Single Carrier Frequency Division Multiplexing (SC-FDM)
Communication System with Forward Error Correction

Taisaku Suzuki¹⁾²⁾, Tomohisa Wada²⁾, Hiromasa Yamada³⁾, Shigeo Nakagawa³⁾

¹⁾ Dept. of Information Engineering, University of the Ryukyus

²⁾ National Institute of Technology, Okinawa College

³⁾ Oki Seatec Co., Ltd.

2017/9/21

Outline



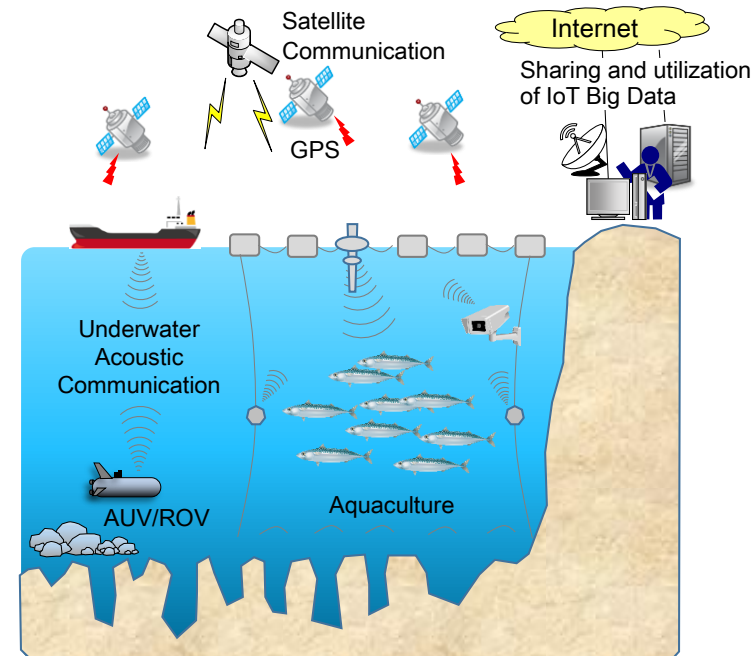
1. Backgrounds
2. Proposed Communication System
3. Communication System Characteristics
4. Ocean Experiment Results
5. Conclusion



Backgrounds

Target Application of System

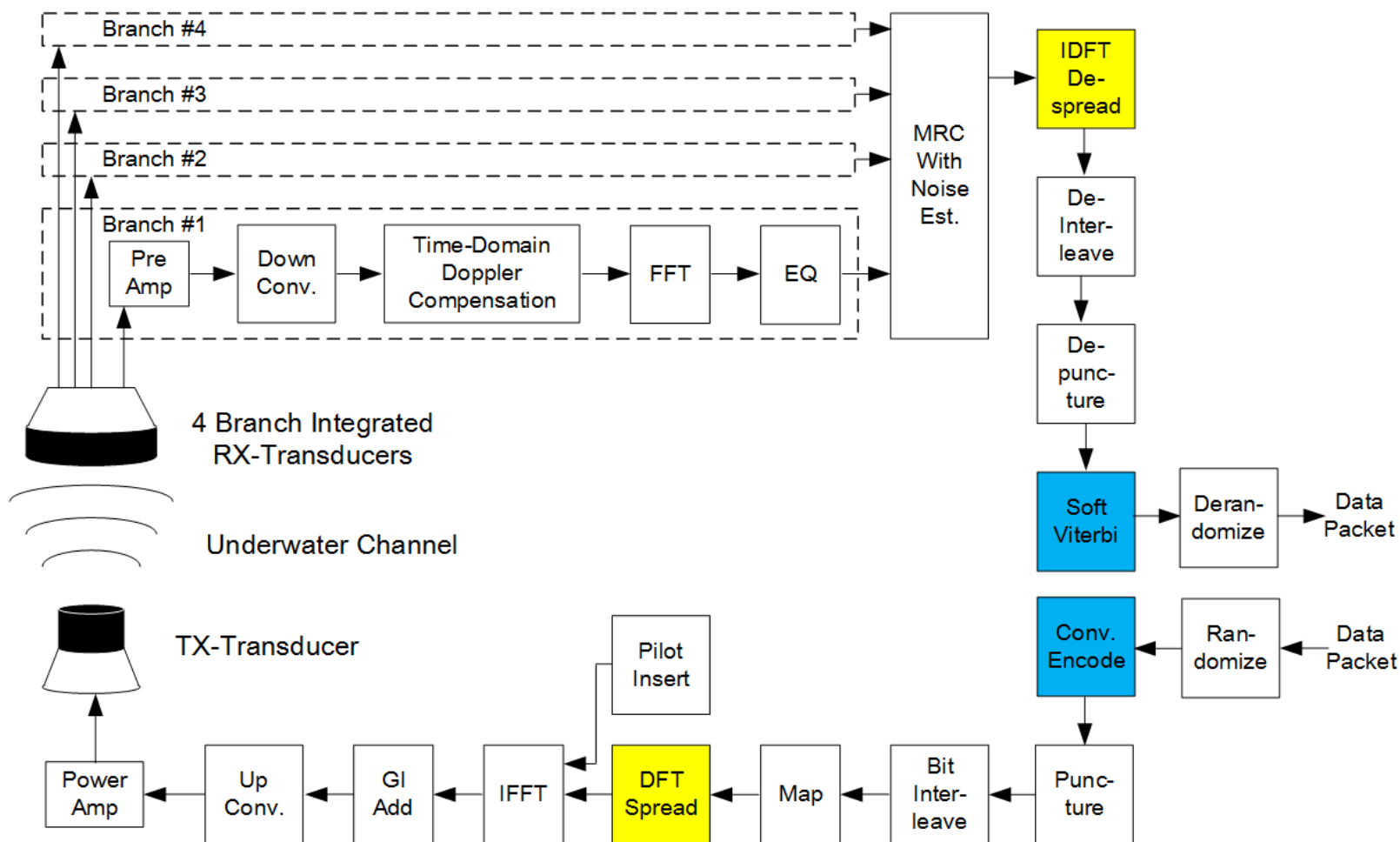
- Underwater acoustic wireless communication is needed to transmit the digital data between equipment.
 - Image or movie data transmission from deep ROV and AUV to surface ship.
 - Data collection of aquatic animals and plants etc.
 - e.g. To control the ration in aquaculture.
 - Control data transfer in the opposite direction
 - e.g. Information exchange between divers
 - Collecting biological information data necessary to manage the safety diving



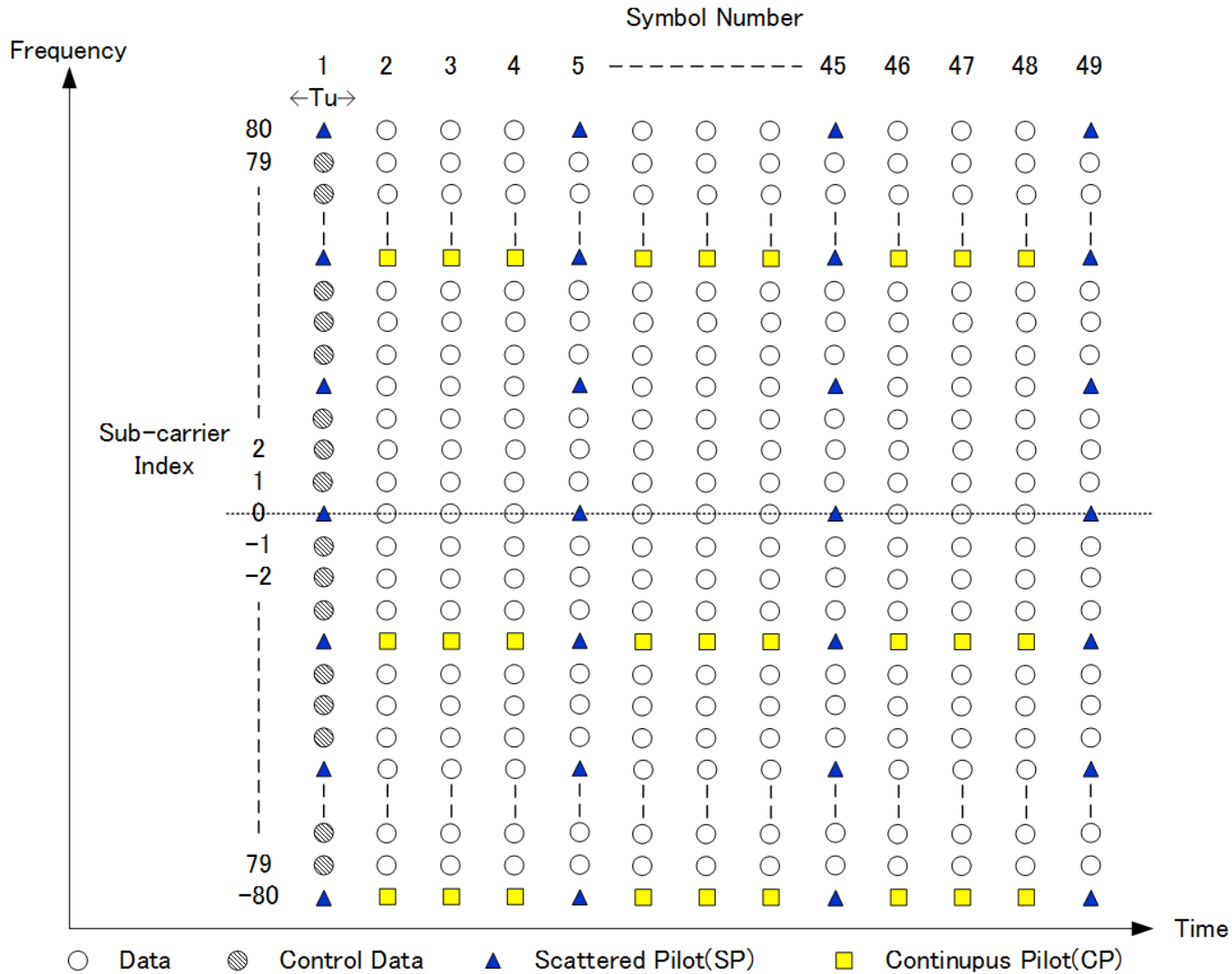


Proposed Communication System

Block Diagram of Proposed System



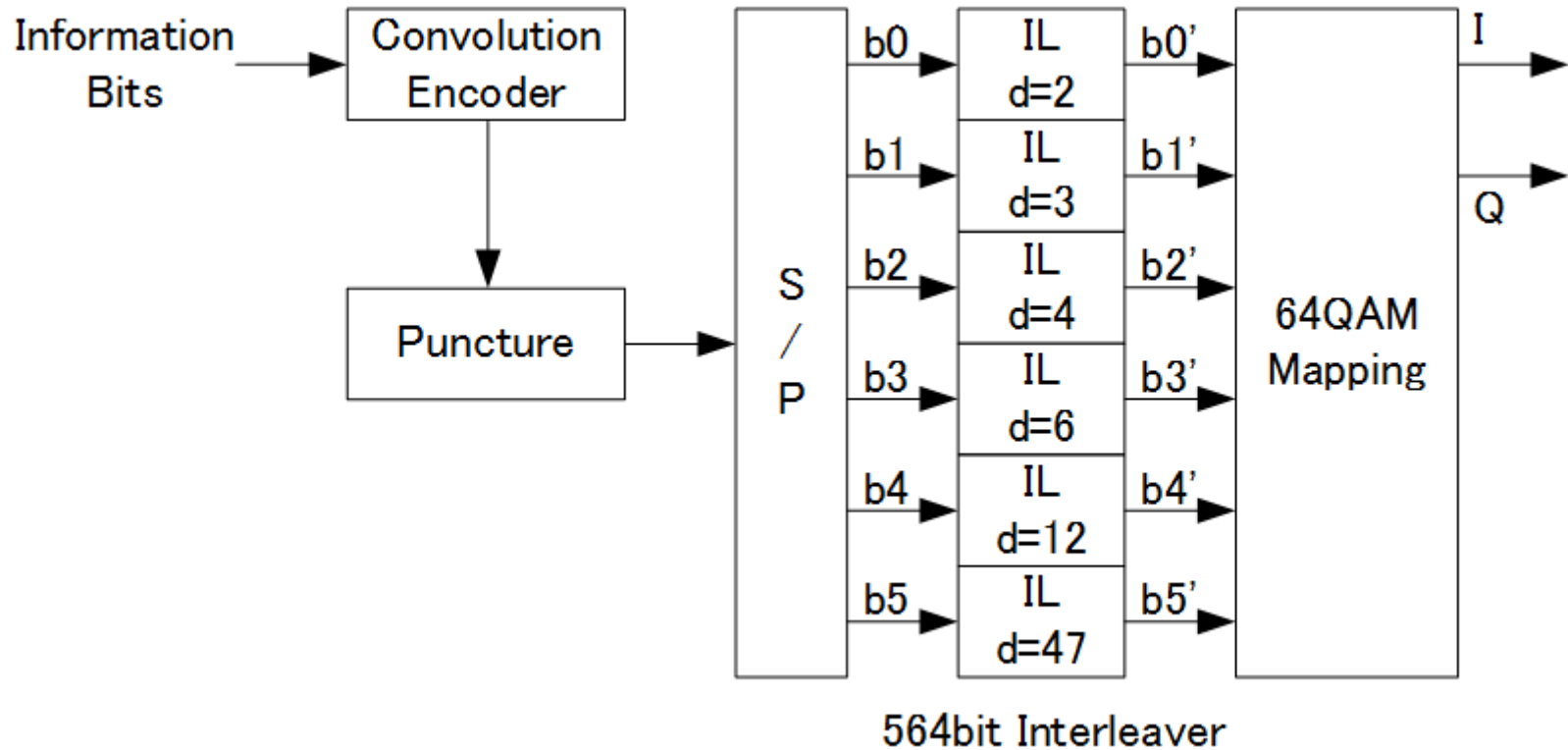
Time-frequency representation of system



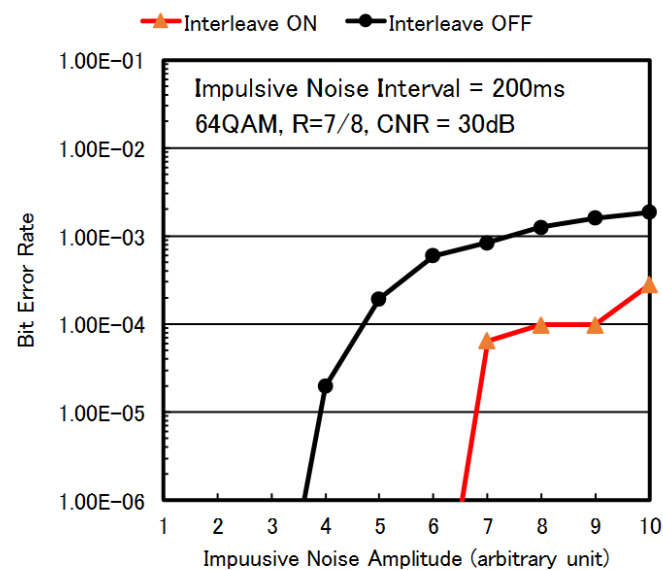
SC-FDM System Feature

Parameters	Value
TX-RX Elements	1 TX and 4 RX Transducer
Sampling Frequency	102.4 kHz
Transmission Band	20 – 28 kHz
FFT Size	2048 points
SC-FDM symbol length T	20.0 ms
GI length T_g	2.8125 ms (288 points)
Sub Carrier Spacing	50 Hz
Number of Sub Carrier	161
Packet length	49 symbols = 1.12 s
Carrier Modulation	QPSK / 16QAM / 64QAM, BPSK(only control)
Interleaver Size	564 Carrier Symbol
Channel Coding	Convolutional Code
Constraint Length K	7
Code Rate R	1/2, 2/3, 3/4, 5/6, 7/8
Max. Data Rate with FEC	31.8 kbps (64QAM, $R=7/8$)
Average TX power	166dB

Transmitter's Channel Coding

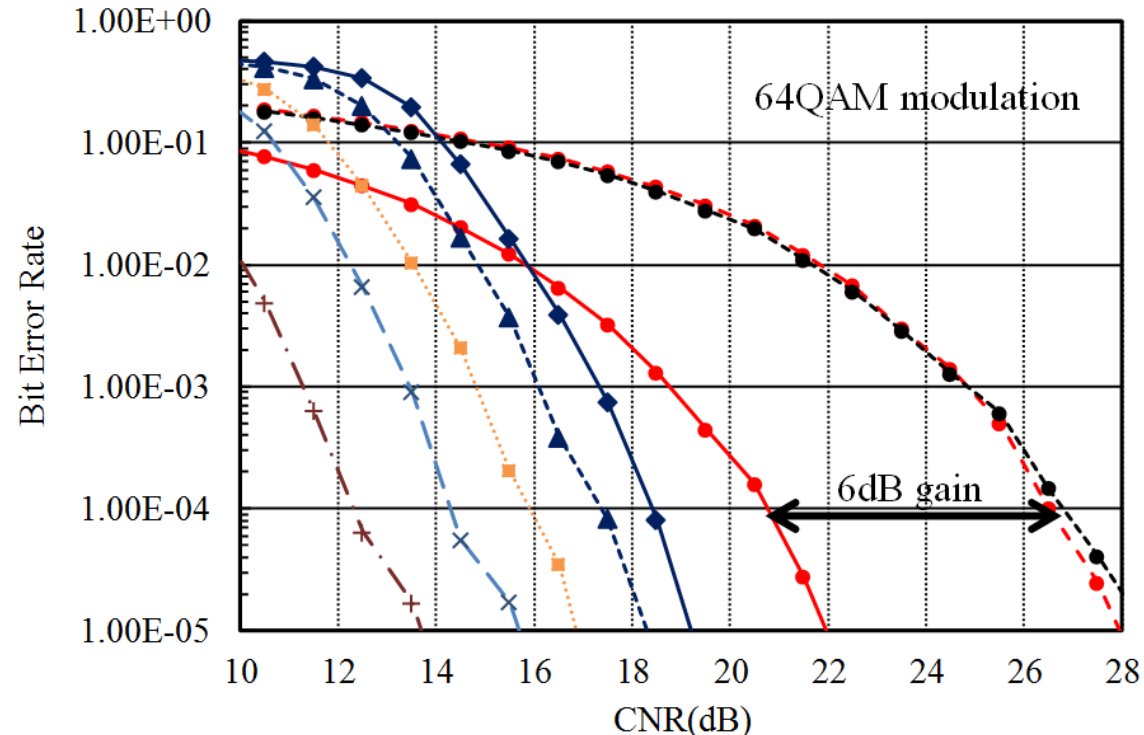


Simulated and Measured BER for 64QAM



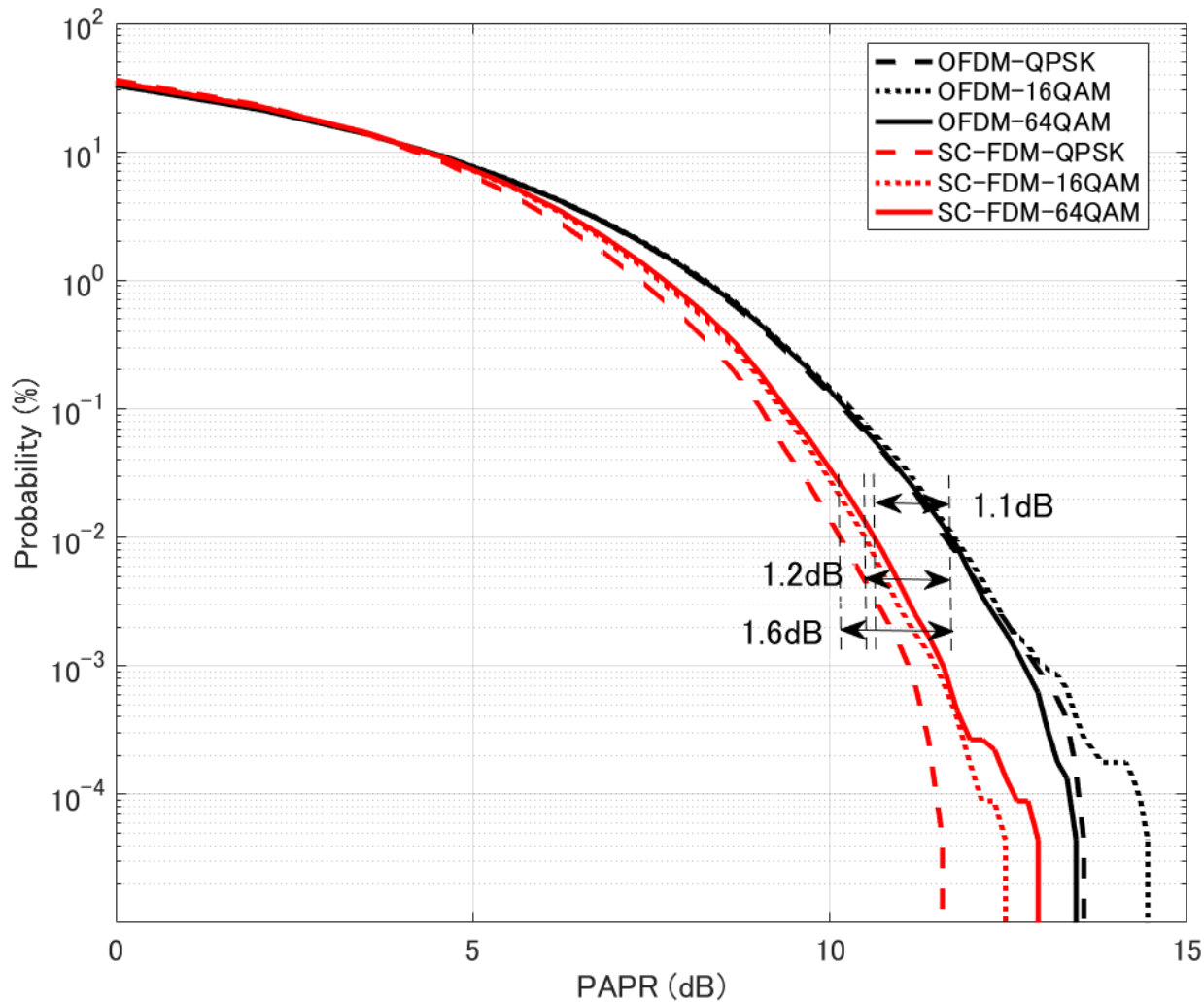
Simulated BER

- SC-FDM_1Branch_nofec
- OFDM_1Branch_nofec
- SC-FDM_4Branch_nofec
- SC-FDM_4Branch_R=7/8
- ▲- SC-FDM_4Branch_R=5/6
- SC-FDM_4Branch_R=3/4
- ×- SC-FDM_4Branch_R=2/3
- + - SC-FDM_4Branch_R=1/2



Measured BER for 64QAM
(in laboratory water pool)

The Simulated PAPR comparison between SC-FDM and OFDM

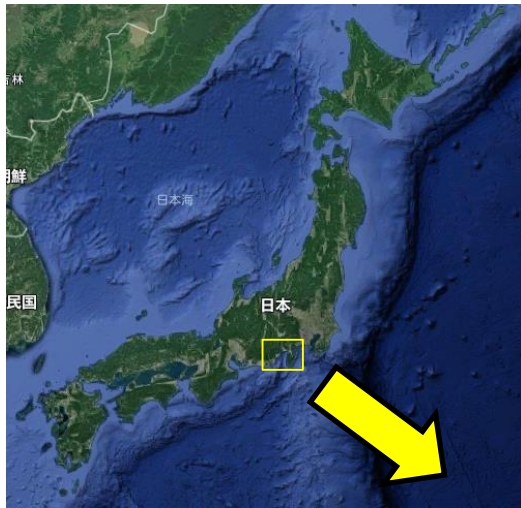


Simulated PAPR (Peak to Average Power Ratio)



Ocean Experiment Results

Ocean Experiment Site



Transmitter and Receiver System

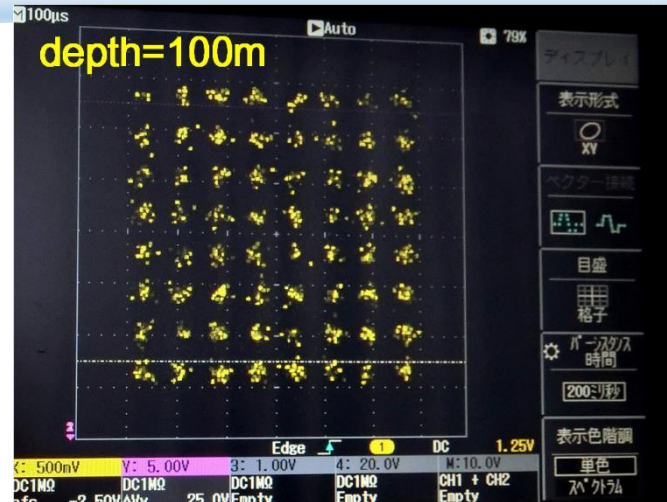


Transmitter System

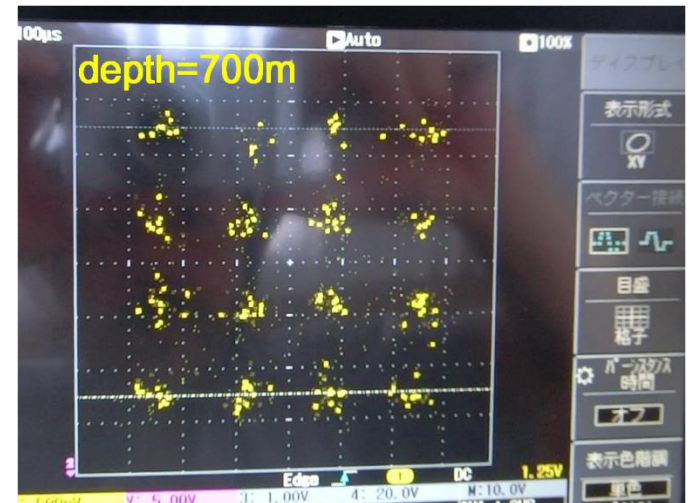
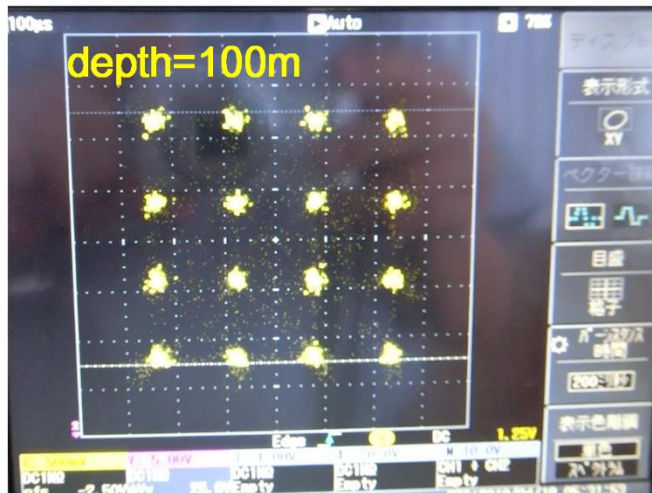


Receiver System

Measured Constellation

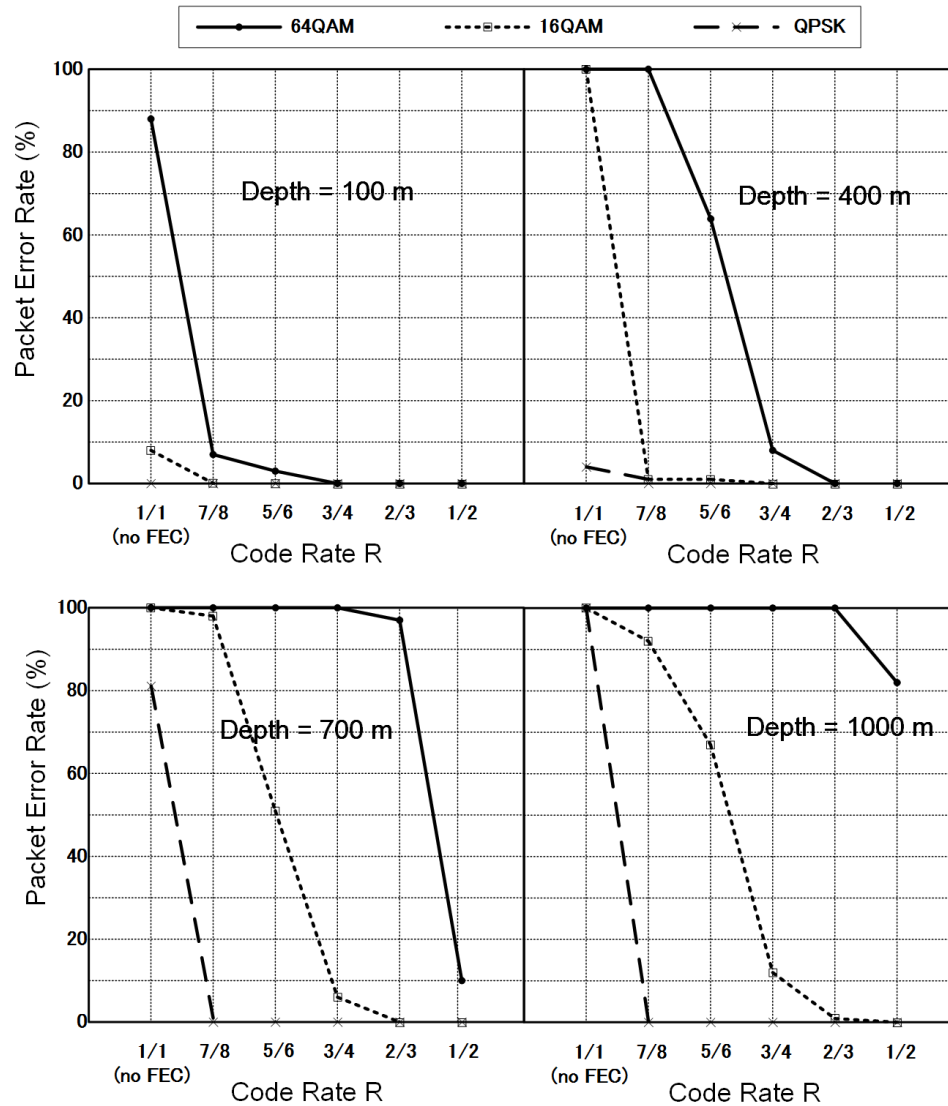


64QAM constellation at 100m depth.



16QAM constellation at 100m and 700m depth.

Measured Packet Error Rate in Each Depth



Transferred Information Size in One Packet

Modulation	Code Rate	Packet Size (kb)	Rate (kb/s)
QPSK	1/2	6.762	6.049
	2/3	9.018	8.068
	3/4	10.146	9.077
	5/6	11.274	10.086
	7/8	11.838	10.590
16QAM	1/2	13.530	12.104
	2/3	18.042	16.140
	3/4	20.298	18.159
	5/6	22.554	20.177
	7/8	23.682	21.186
64QAM	1/2	20.298	18.159
	2/3	27.066	24.213
	3/4	30.450	27.241
	5/6	33.834	30.268
	7/8	35.526	31.782

Conclusion

Conclusion

- By utilizing DFT pre-code, 1.1 to 1.6 dB lower PAPR is realized with SC-FDM comparing with OFDM.
- 3 carrier modulations such as QPSK / 16QAM / 64QAM and 5 code rates ($1/2$, $2/3$, $3/4$, $5/6$, $7/8$) are supported.
- Using 64QAM with code rate $R=7/8$, a 31.2 kbps in 8kHz maximum channel bandwidth could be achieved.
- At the depth of 100m, with 64QAM and code rate $R=3/4$, $PER=0\%$ is observed.
- At the depth of 400m, with 64QAM and $R=2/3$, $PER=0\%$ is also achieved.
- At the depth of both 700m and 1000m, with 16QAM and code rate $R=2/3$, PER closed to 0% is realized.

2018年3月16日金曜に、 那覇で次回開催予定

沖縄県

平成29年
2/12日
午後1時～午後5時

会場
沖縄県那覇市旭町116-37
沖縄県市町村自治会館
2階 ホール

基調講演
「沖縄近海における
海洋生物資源の現況」(座長)
「海洋生物資源開発技術」(座長)

**パネルディスカッション
オープンセッション**
「おきなわの海洋資源と
海洋新産業の創出」(座長)

特別座談
「海洋新産業企業観」

**最新
ニュース**
海産品採集地別賞状
賞状が「従来の推定よりも
桁違いに多い可能性」

**参加無料
事前予約制**

参加申し込みはコチラ
(スマートフォン用)
沖縄県農工労働部産業政策課
<http://www.pref.okinawa.jp/industry/industry/>

主催 沖縄県
協力 JAMSTEC(国立研究開発法人海洋研究開発機構)
OQOAC(国際海洋観測情報センター)
JQOABC(国立研究開発法人石炭天然ガス-気象観測資源機構)

沖縄県産業政策推進機構 沖縄県環境科学センター 共同企画
E-mail: symposium2016@ocw.or.jp 事務局 OQO-1045-1118