

[依頼講演] 水中移動時のドップラー耐性と初期同期を強化した 水中 OFDM 通信システム

和田 知久¹⁾ 大城 史帆²⁾ ユキコ ミュラー²⁾ 山田 浩正³⁾

1) 琉球大学 工学部工学科知能情報コース, wada@ie.u-ryukyu.ac.jp

2) 琉球大学理工学研究科 総合知能工学専攻電子情報工学コース

3) OKI コムエコーズ、静岡

あらまし 本技術報告は、依頼講演で利用する講演スライドを集めてあり、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ドップラー耐性向上に関する研究成果を含んでいる。本資料では、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、特に AUV などの水中船の急加速時に課題となっていた、1) 通信開始時の初期同期の改良および、2) 受信コンスタレーションの乱れによるビットエラー率 (BER) の改善をターゲットとした信号処理方式の改良案を示し、その結果をコンピュータシミュレーションおよびプール実験での結果を紹介している。

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

[Invited Lecture] An UWA OFDM Communication System with Improved Doppler compensation and Initial Synchronization

Tomohisa Wada¹⁾, Shiho Oshiro²⁾, Yukiko Muller²⁾ and Hiromasa Yamada³⁾

1) Dept. of Engineering, University of the Ryukyus, Okinawa Japan

2) Graduate School of Engineering and Science, University of the Ryukyus, Okinawa Japan

3) OKI Com-Echoes, Shizuoka Japan

Abstract This technical report includes invited lecture materials on Underwater Acoustic Wireless Communication system based on Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) with enhanced Doppler frequency shift compensation. Based on the previous OFDM communication system with Two steps Doppler compensation Algorithm, two new technologies are proposed targeting both to improve initial synchronization and to decrease Bit Error Rate caused by rapid underwater vehicle movement. This report also discloses the computer simulation results and pool experiment results.

Keywords Underwater Acoustic Communication, Networking, OFDM, Doppler effect.

1. 内容あらまし

水中移動体とたとえば母船間の動画伝送を目的とした音響無線通信では、水中では音の伝搬速度が 1500m/sec 程度と電波等に比べて著しく低く、移動によりドップラー効果により信号変動の影響が大きい。また、音響信号のパスバンド周波数も例えば 24kHz など電波に比べて低く、送受信の移動では、周波数や位相の補償だけでは困難で、時間領域の受信信号の伸び縮み処理の組み合わせも必要である [1,2]。

本技術研究報告では、文献 [2] の 2 段階ドップラー補償アルゴリズムをベースに、初期同期およびチャネル伝達関数推定の改善を行うことで、高加速度状況でのシステム性能の向上を報告する [3]。

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, Yukiko Muller, Hiromasa Yamada and Tomohisa Wada, "An UWA OFDM Communication System with Improved Doppler compensation and Initial Synchronization," to be presented at MTS/IEEE OCEANS 2022 Hampton Roads Virginia Beach Convention Center In-Person & Virtual: October 17-20, 2022.

水中無線技術研究会 (UWT)

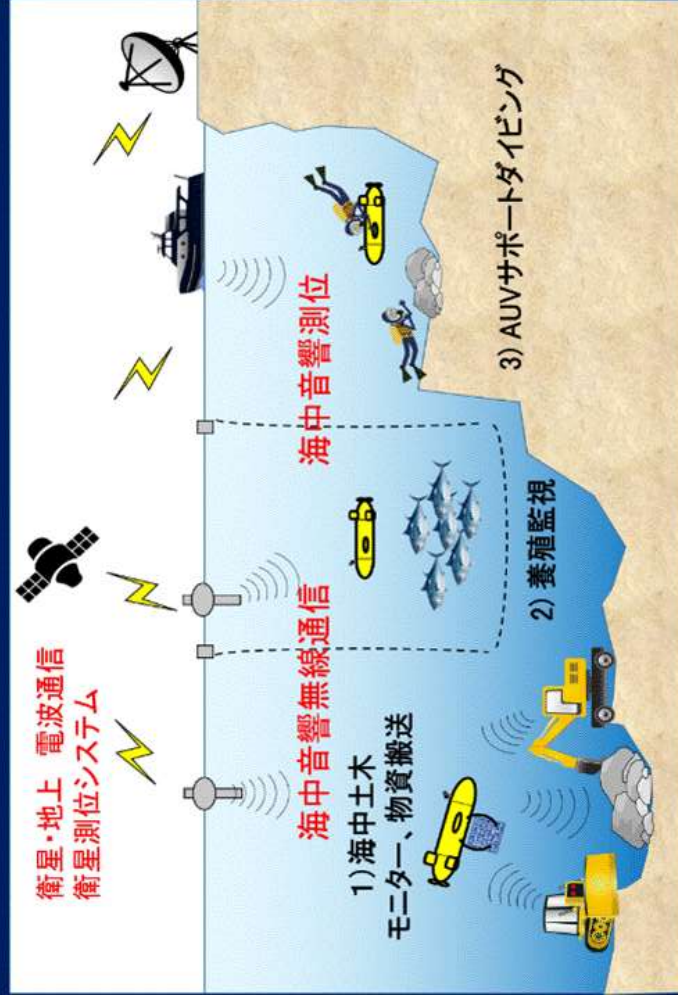
[依頼講演] 水中移動時のドップラー耐性と初期同期 を強化した水中OFDM通信システム

和田知久・大城史帆・ユキコ ミュラー (琉球大)
山田浩正 (OKIコムエコーズ)

参照 : Shiho Oshiro, Yukiko Muller, Hiromasa Yamada and Tomohisa Wada, "An UWA OFDM Communication System with Improved Doppler compensation and Initial Synchronization," MTS/IEEE OCEANS 2022 Hampton Roads Virginia Beach Convention Center In-Person & Virtual: October 17-20, 2022.

1

海中でも、陸上のような 低コストなドローンを活用するには？



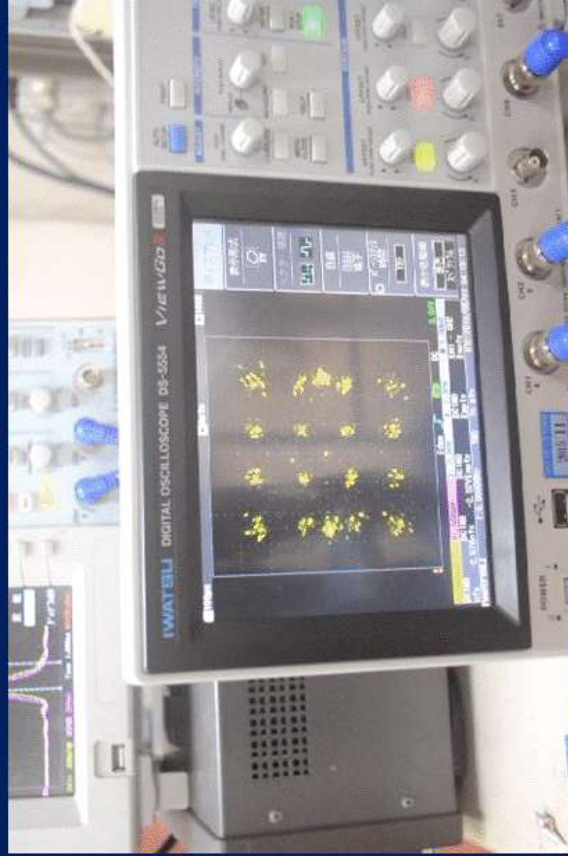
- 課題：水中では電波が使えない
- 1. 海中GPSエリアを簡単に実現したい
→ 海上の移動可能な2基準点を用いて、海中ドローンの群れにGPS情報を提供する新方式を開発中
- 2. 動画伝送可能な無線通信を海中で実現する必要がある
→ 海中で5GやWiFiのような“OFDM”方式の音響通信を実現

本日の発表は、海中音響無線通信のDoppler対策

過去の改善例：水中OFDM音響通信

移動により乱れる

→ 独自信号処理で乱れを補正

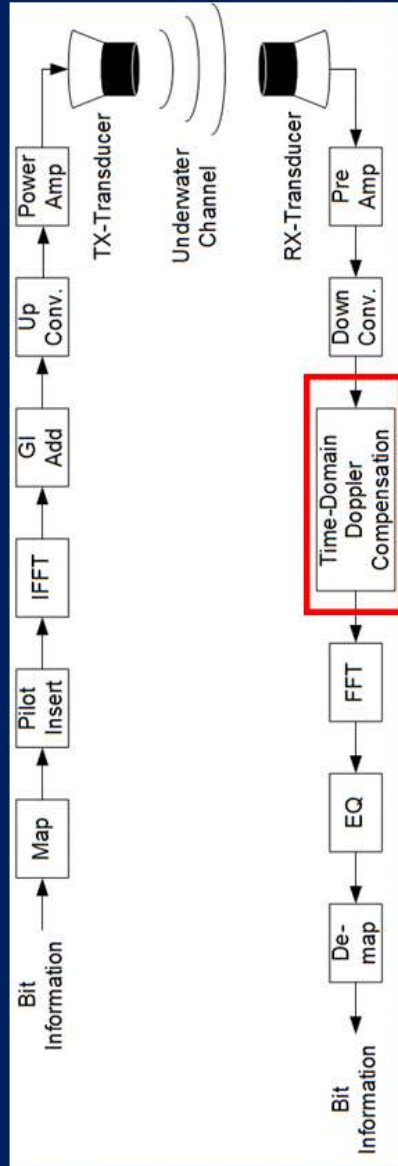


特許第6707737号、位置変動に対して性能低下防止機能を有するOFDM変調を用いた水中超音波通信装置、琉球大学、沖縄工業高等専門学校、OKIコムエコーズ

OFDM通信システム概要

諸元

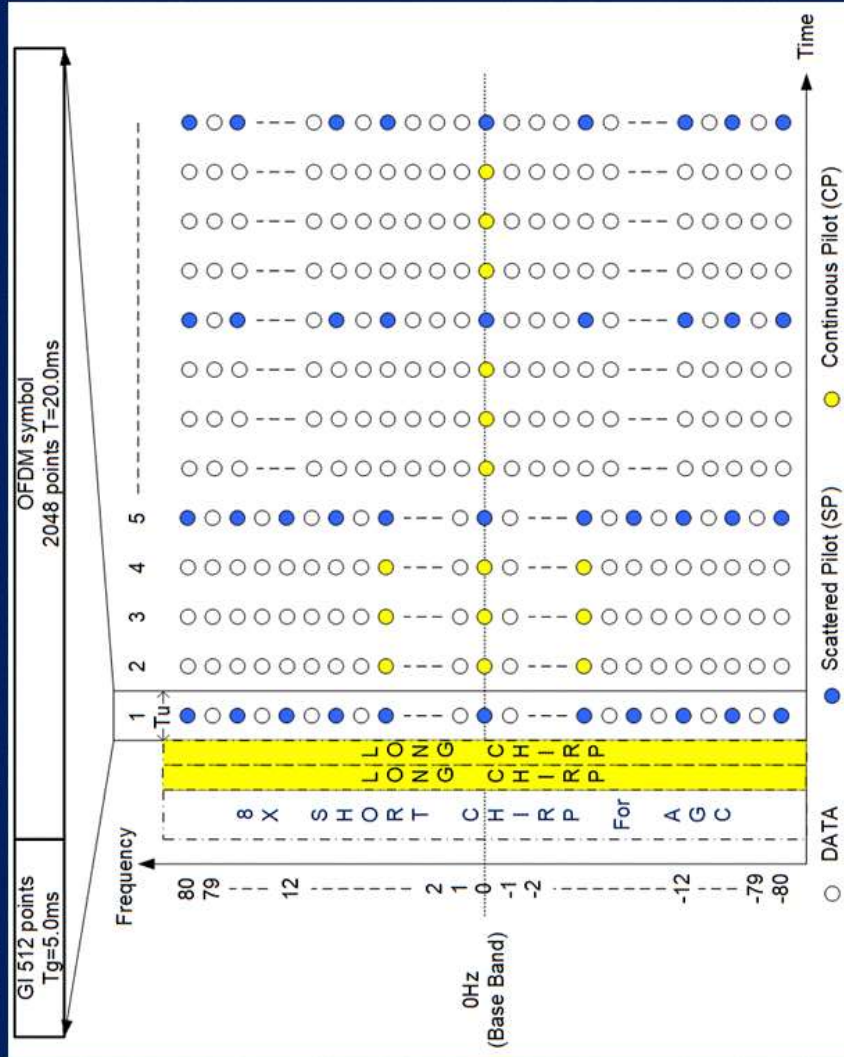
| Parameters | Value |
|-----------------------------|------------------------|
| Sampling Frequency F_s | 102.4kHz |
| Band Width | 8 kHz |
| FFT size | 2048 |
| OFDM symbol length T | 20.0 ms (2048 point) |
| Guard Interval length T_g | 5.0 ms (512 point) |
| Sub-carrier spacing | 50 Hz |
| Number of sub-carrier | 161 |
| Scattered pilot | 81 every 4 OFDM symbol |
| Continuous pilot | 13 |
| Carrier Modulation | QPSK/16QAM/64QAM |



ブロック図

通常OFDM通信システムとの違いは、
受信側の時間領域信ドップラー補正

OFDMの時間周波数表示



青●: 離散パイロット(SP)

- ・ 40FDMシンボルごと
- ・ 2サブキャリアごと

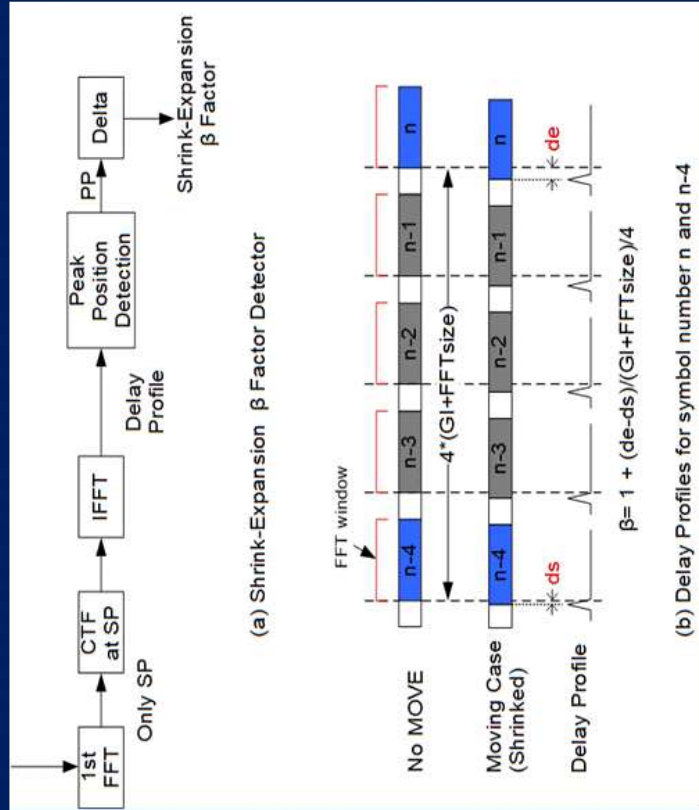
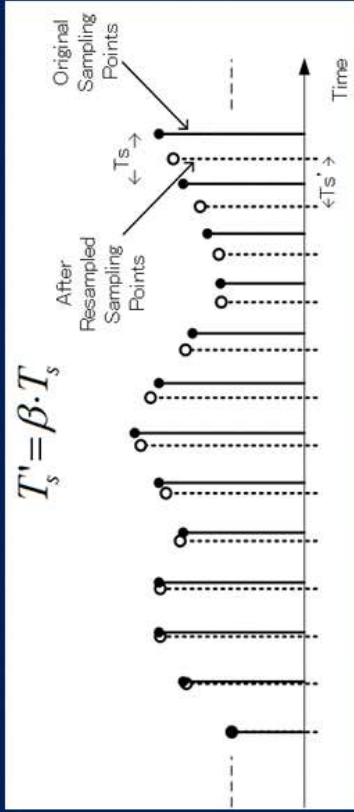
黄●: 連続パイロット(CP)

- ・ 13サブキャリアごと
- 白○: データ

・ QPSK/16QAM/64QAM

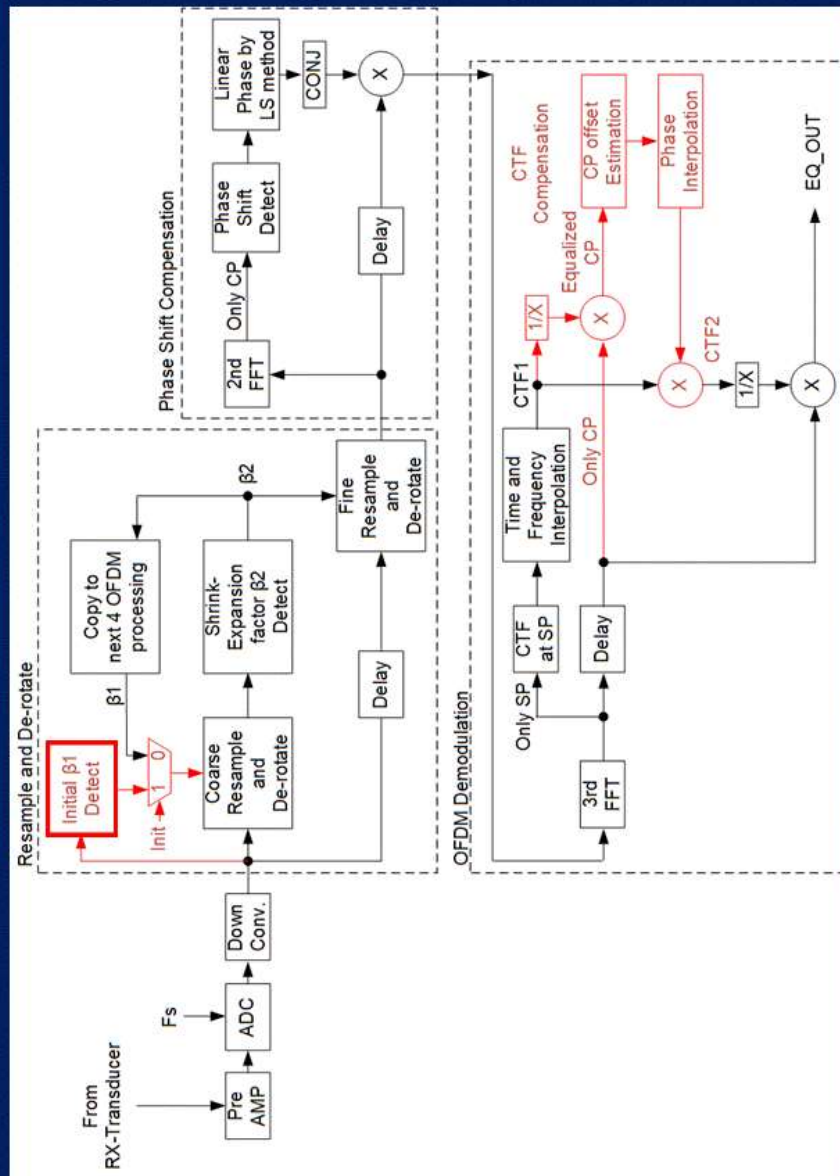
時間領域ドップラー補償：延び縮み処理

β : 延び縮み係数



参照 : Mohammad Ariful Hoq, Shlho 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.

受信側詳細ブロック図 (再掲1)

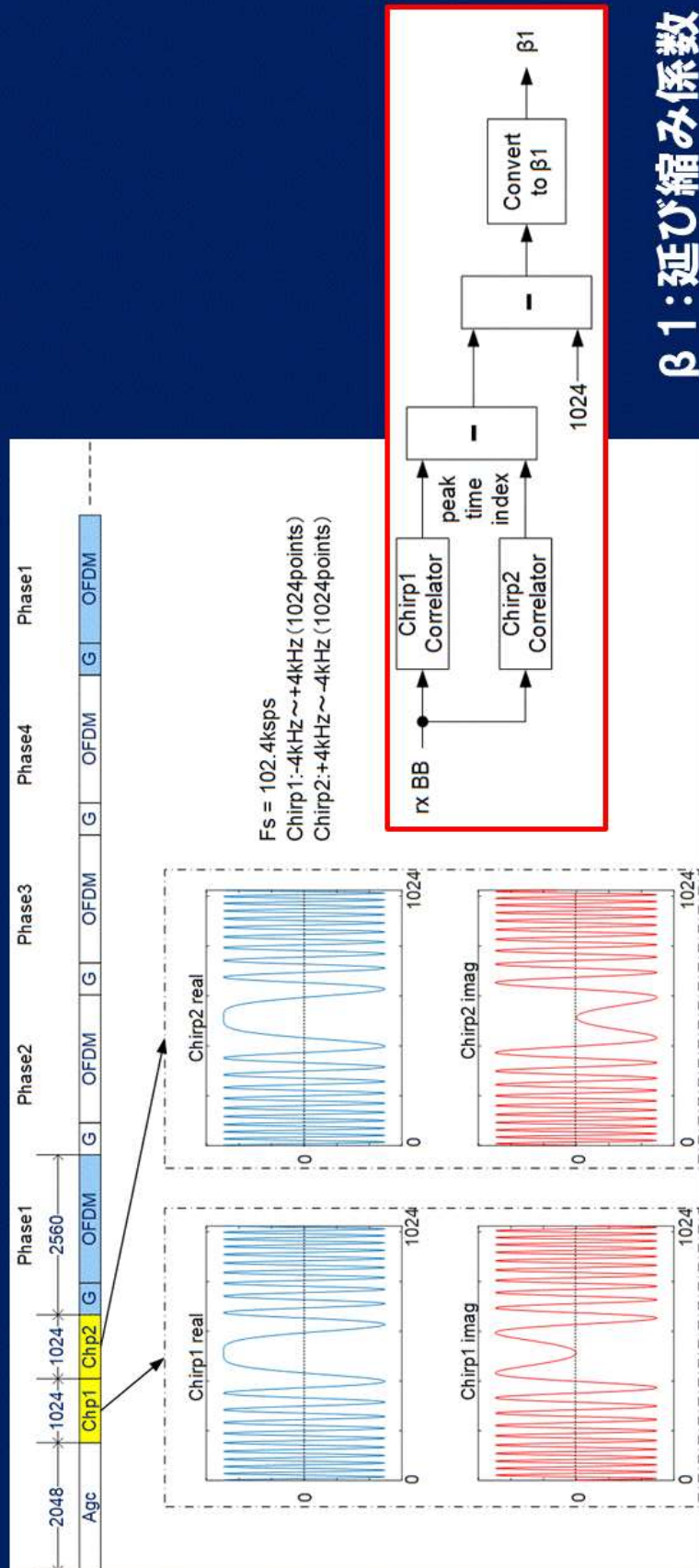


赤の部分: 今回の提案

1. 初期同期改良
 - 初期 β_1 をチャープで検知

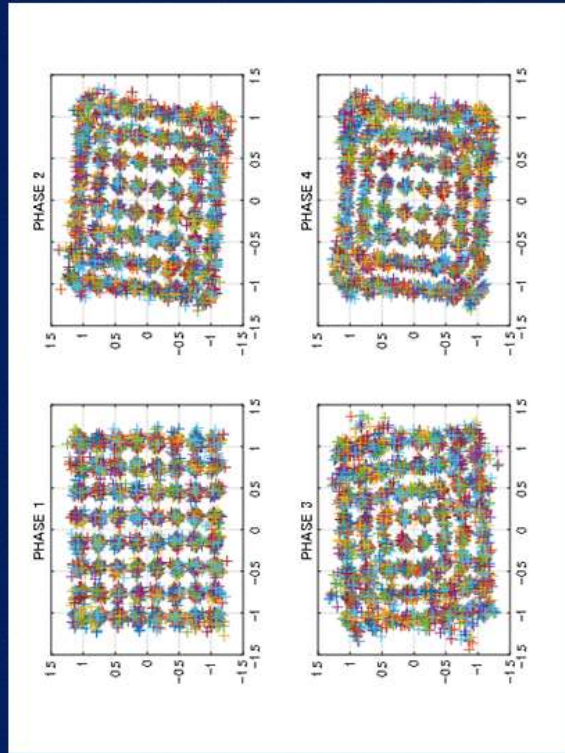
2. チャネル伝達関数(CTF)補正による性能向上

初期受信開始時の延び縮み係数検出

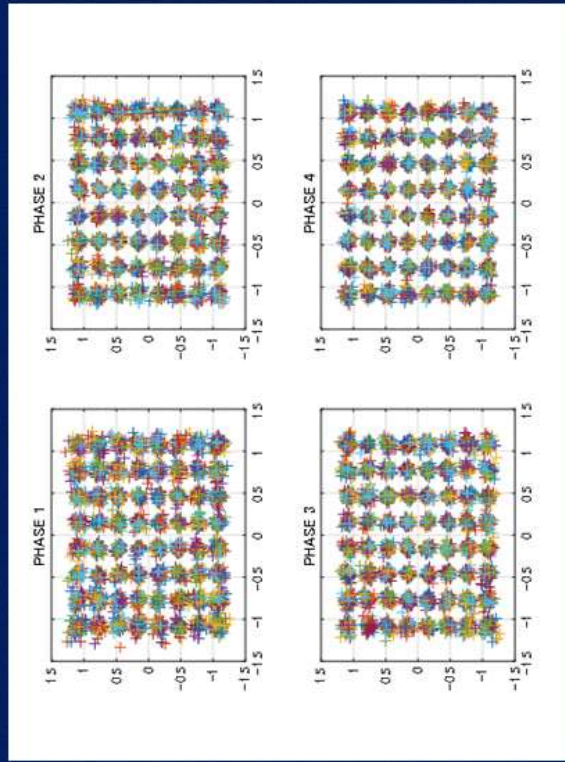


β_1 : 延び縮み係数

CTF補償：速度変化時に、Phase2~4に乱れがある

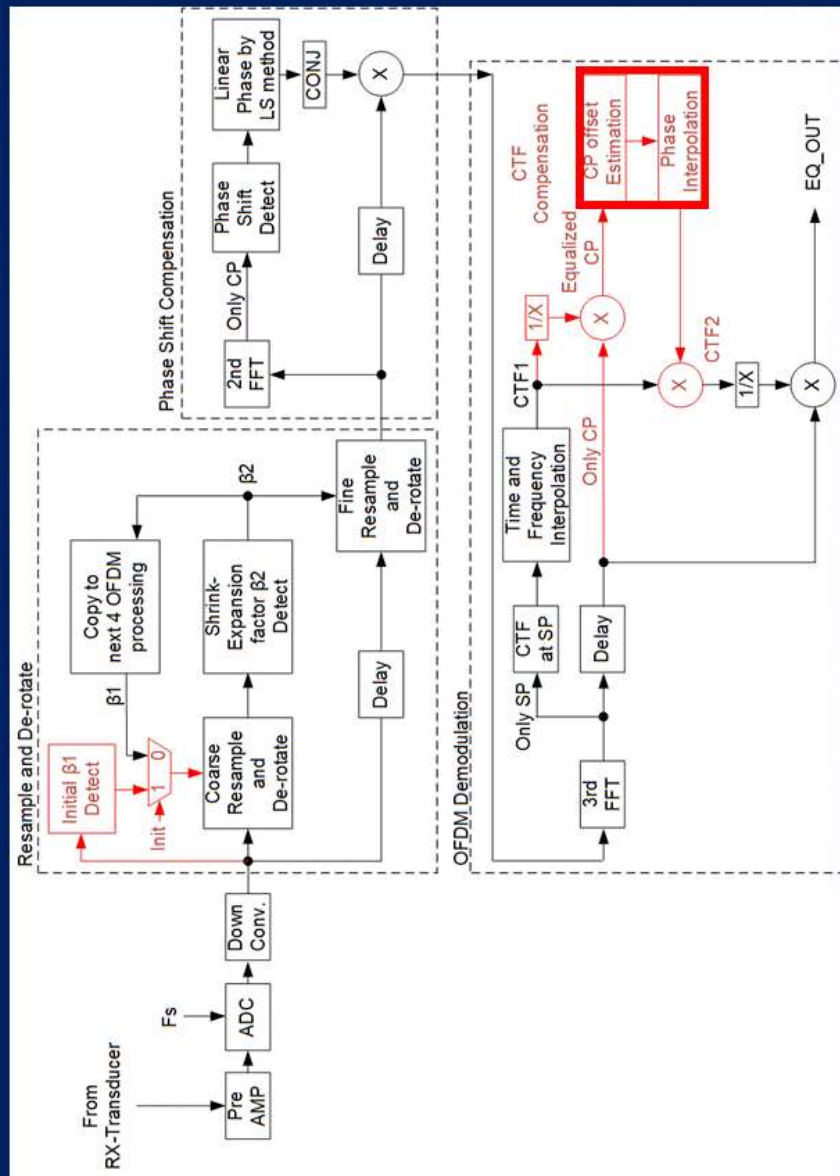


• CTF compensation OFF



• CTF compensation ON

受信側詳細ブロック図 (再掲2)



赤の部分: 今回の提案

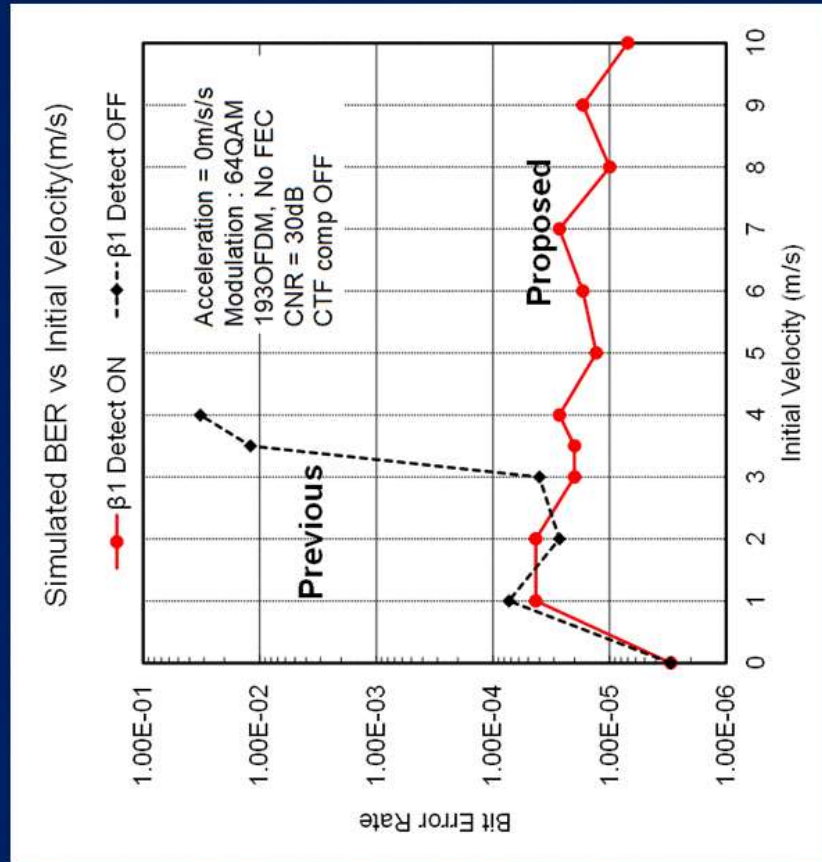
1. 初期同期改良
 - 初期 β_1 検知
2. チャネル伝達関数(CTF)補正による性能向上
 - Phase2-4のCTFの補間ずれを推定
 - 推定したスレ量によりCTF補正

コンピュータ・シミュレーション結果

1. 同期時の初期速度変化時のBER特性
2. 加速度変化時のBER特性
3. CN比(dB)変化時のBER特性
4. 加速ありなし繰り返し時のBER変化

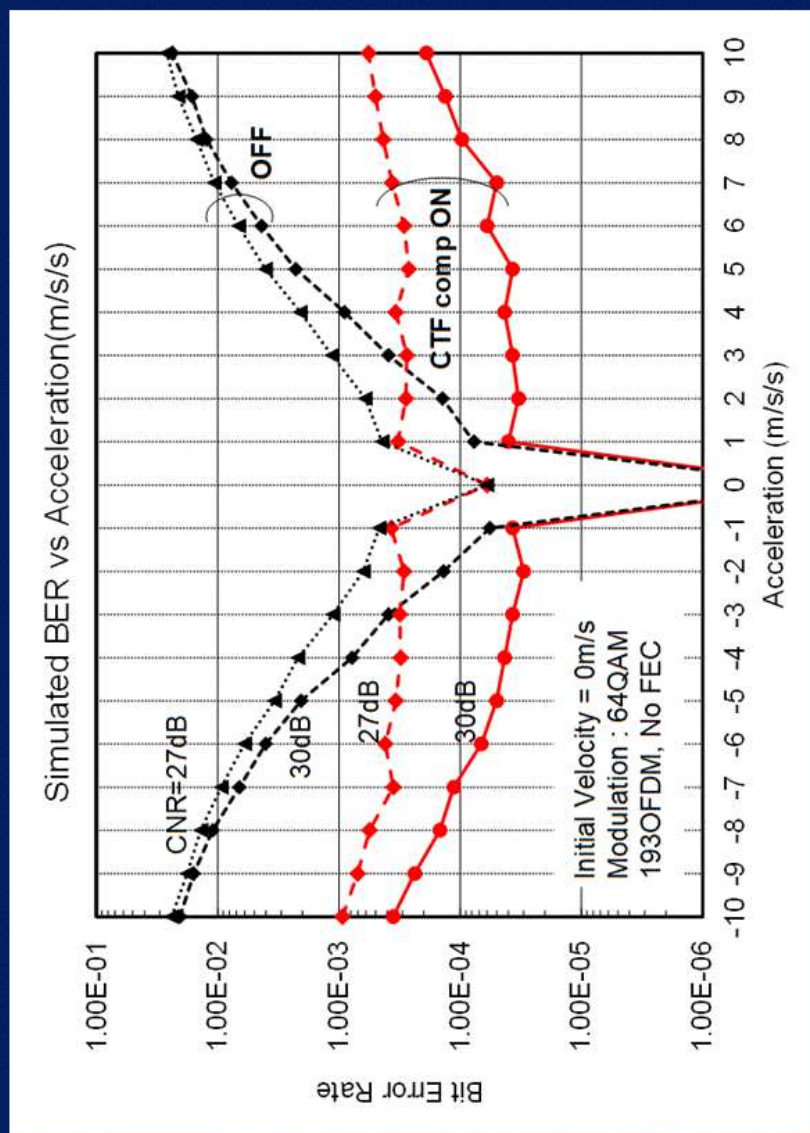
同期時の初期速度変化時のBER特性

- 加速度=0m/s/s
- 64QAM変調
- CNR=30dB
- CTF compensation OFF



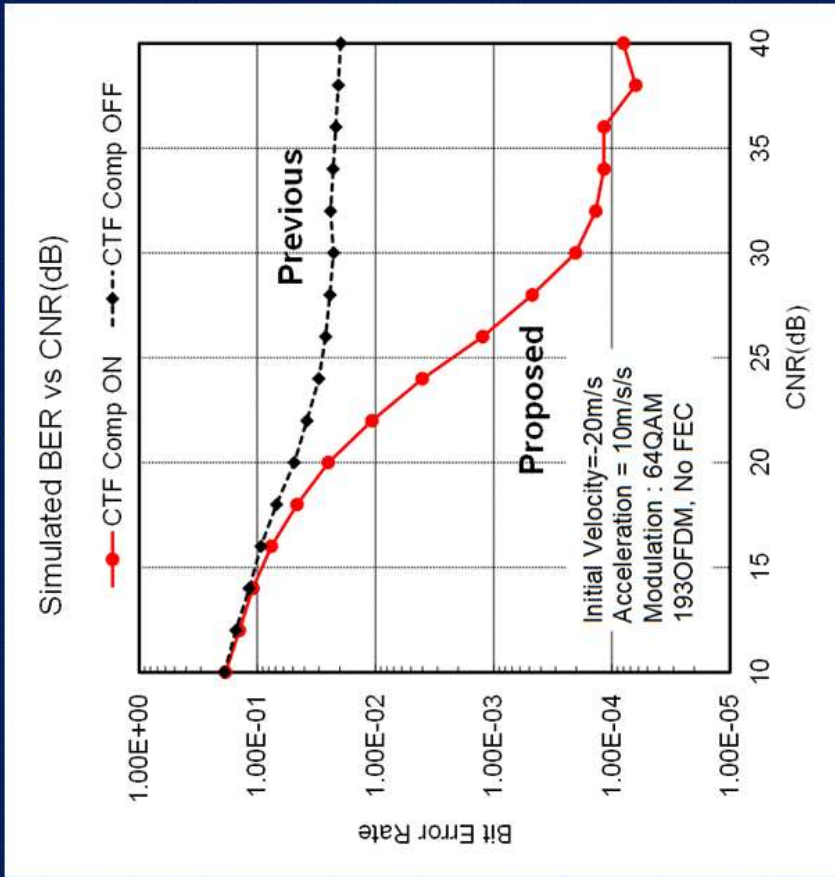
加速度変化時のBER特性

- 初速度 = 0m/s
- 64QAM変調



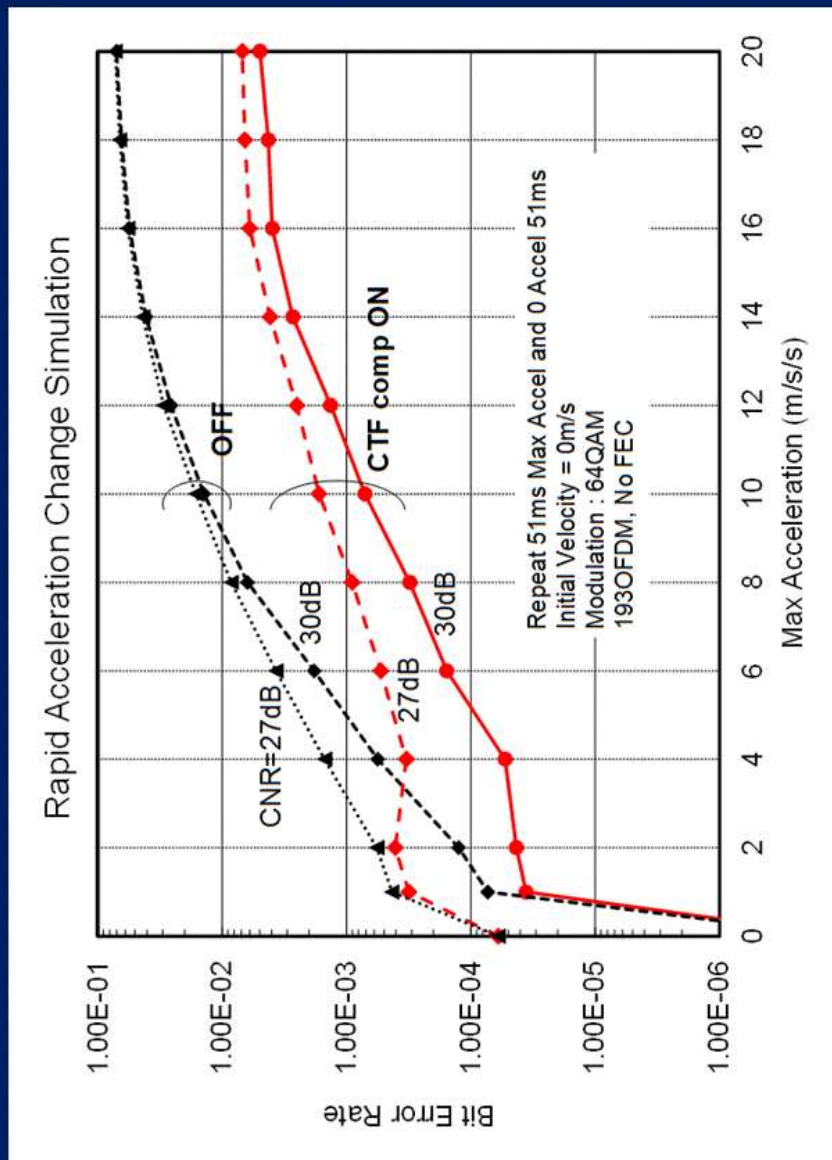
CN比(dB)変化時のBER特性

- 初速度 = 20m/s
- 加速度 = 10m/s/s
- 64QAM変調



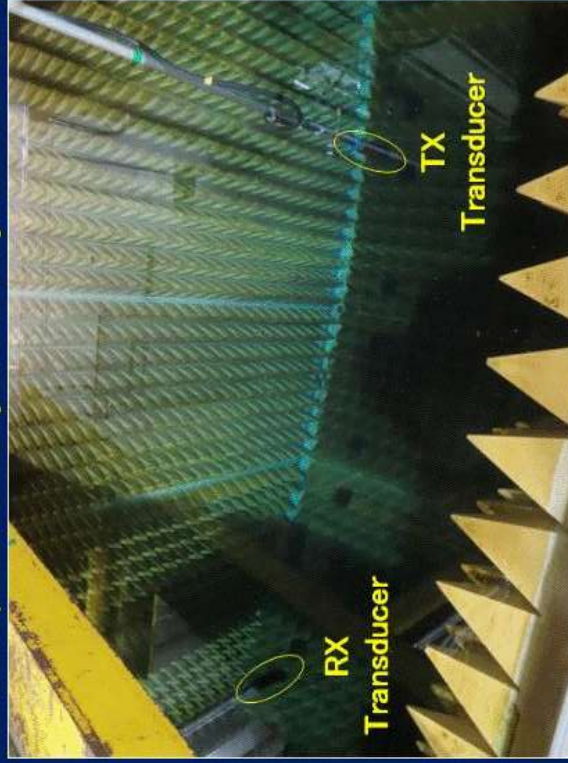
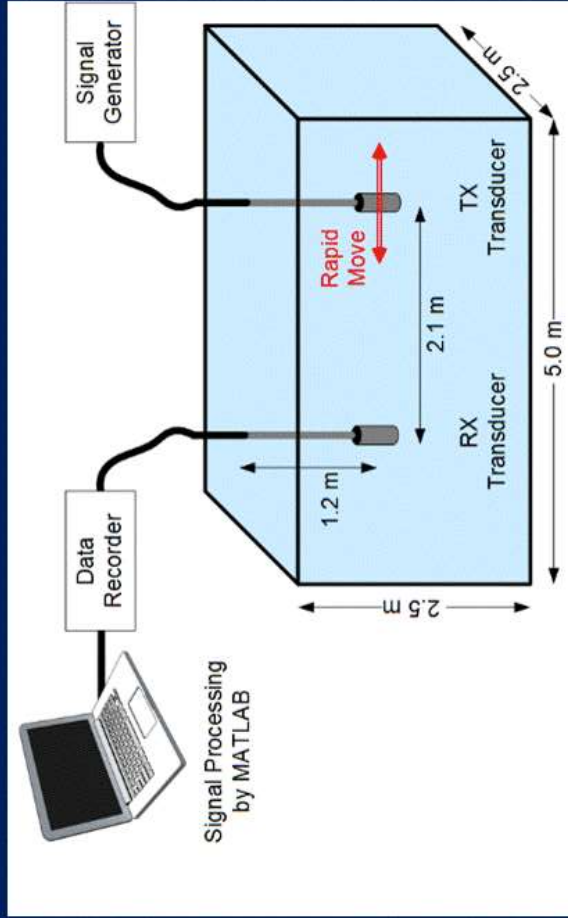
加速ありなし繰り返し時のBER変化

- 加速度印加51ms、
加速なし51msの繰り返し
- 初速度=20m/s
- 64QAM変調



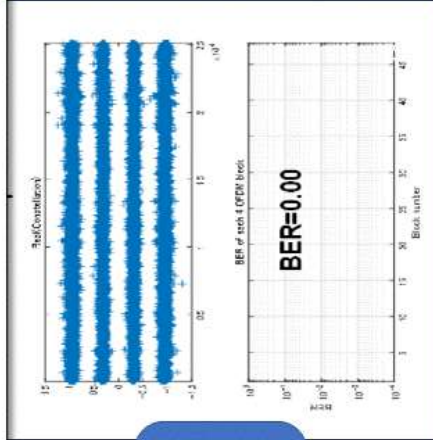
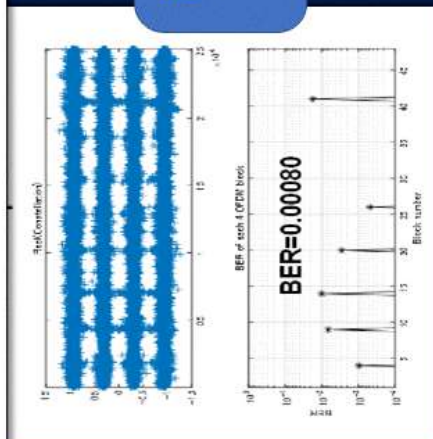
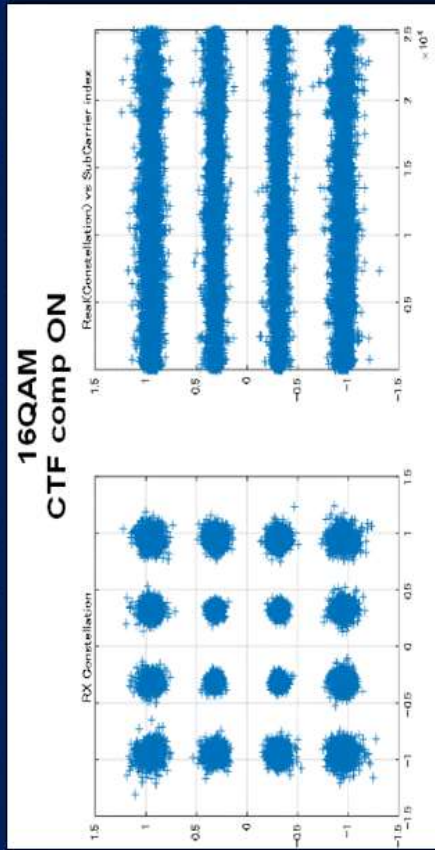
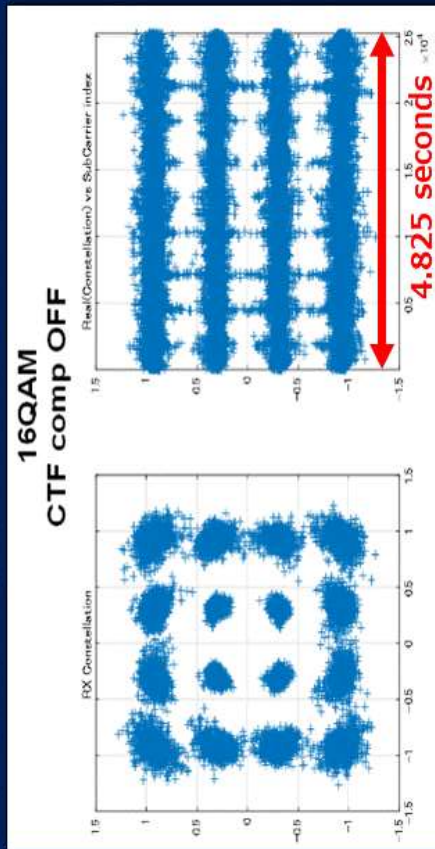
無反射プール実験結果 セットアップ

※沖コムエコーズ社（沼津市内浦）無放射水槽



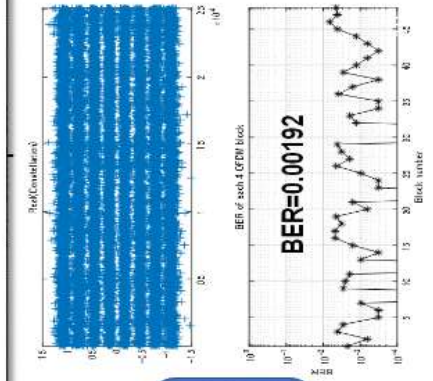
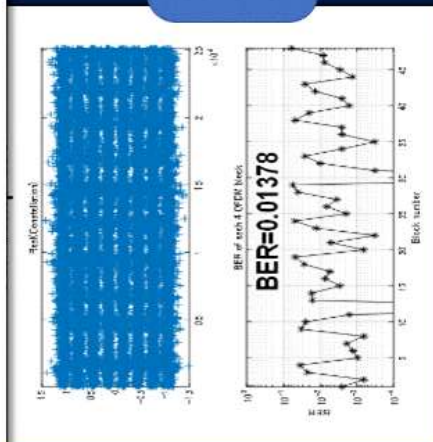
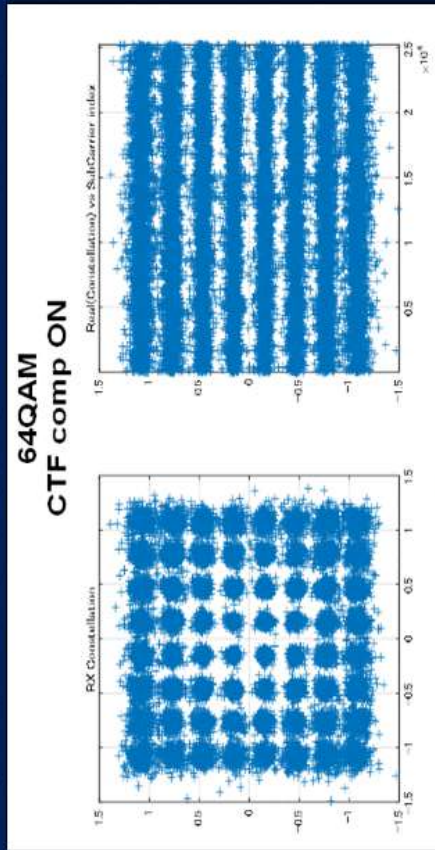
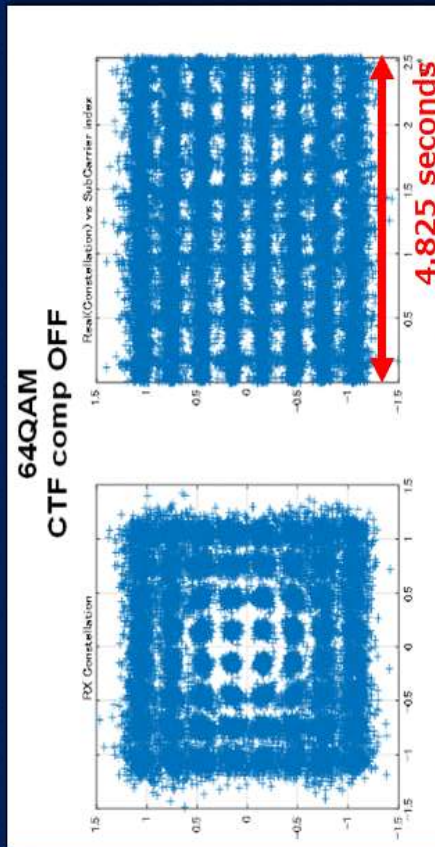
- 送波トランスデューサーを左移動50cmおよび右移動50cmを約1.0秒周期で繰り返す

無反射プー儿実験結果 16QAM変調



BER=0.00080 → Error Free
改善

無反射プー儿実験結果 64QAM変調



BER=0.0138 → 0.00192
約1桁改善

まとめ

- 従来開発した2段階ドップラー補償方式に対して、以下2点の改良を実施
 1. 初期同期時の初速度に対応する延び縮み係数 β 1検知を導入し、高初速度時の同期エラーを回避
 2. 高加速時のチャネル伝達関数CTFの補間誤差を補償するCTF補償を導入し、BER性能の向上を実現
- コンピュータ・シミュレーションおよびプール実験において、性能向上を確認した
- 今後、さらなる補正方式の検討を重ねる