

WSPL研究成果資料 水中音響通信に関する研究成果

立命館大学 理工学部 電子情報工学科
無線信号処理研究室
久保 博嗣

目次

- (1) 研究の背景
- (2) 移動体音響通信としての水中音響通信
- (3) 移動体音響通信の課題
- (4) 音響通信性能評価プラットフォーム
- (5) 琵琶湖浅瀬環境でのフィールド評価結果
- (6) チャネルサウンダの性能改善
- (7) 研究成果

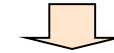
2017年 5月 25日



1

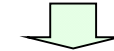
研究の背景

RF帯無線通信の適用が困難な条件での無線通信の実現



対応策: RF帯無線→音響通信

音響通信システム実現に関する技術的課題の抽出



最大の課題: 光速→音速

厳しいダブルセレクトティブ(時間・周波数選択性)の発生



最も厳しい環境に挑戦

移動体音響通信(水中音響通信, 陸上音響通信)

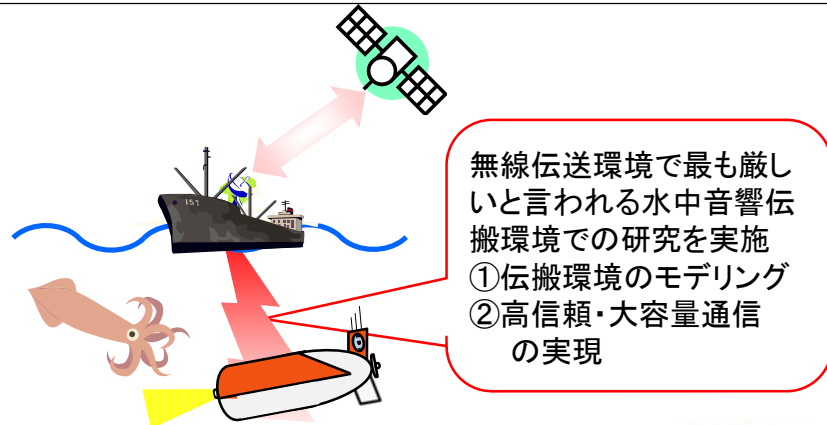


RF : radio frequency

2

水中音響通信

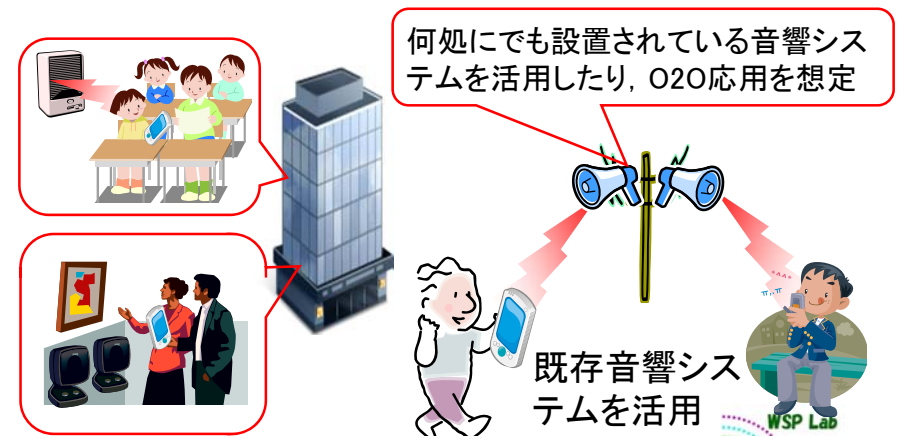
①海底資源調査, ②深海での生物調査などへの活用のために, 水中音響通信に関する研究を実施中



3

陸上音響通信

既存の音響システムを活用したり, 音波による位置特定のため, 陸上音響通信に関する研究を実施中

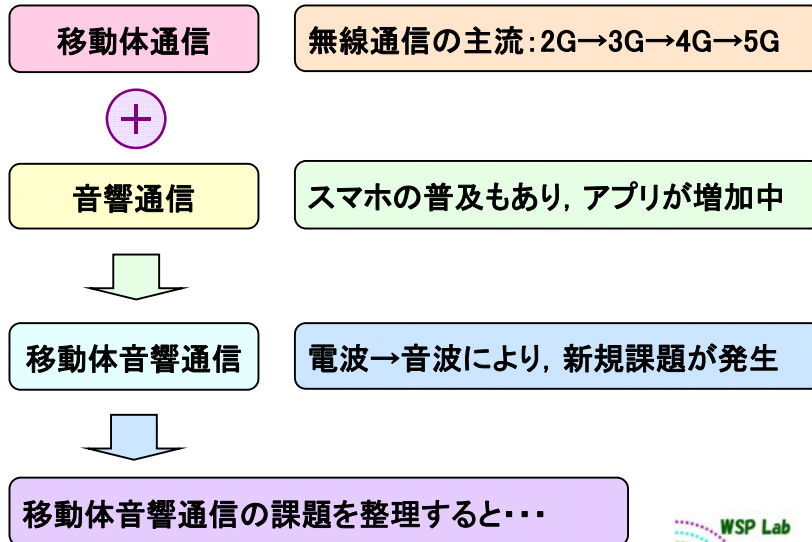


O2O : Online to Offline



4

移動体音響通信とは？



5

電波→音波による移動体通信環境の変化



①媒体の伝搬速度の変化

電波 ($3.0 \times 10^8 \text{m/s}$) → 音波 (空間 340m/s , 水中 1500m/s)

②利用可能な周波数(比帯域)の変化

電波 (3THz以下, 比帯域小) → 音波 (100kHz以下, 比帯域大)

③到達距離の変化

電波 (数10kmを超える) → 音波 (水中でも数km程度)



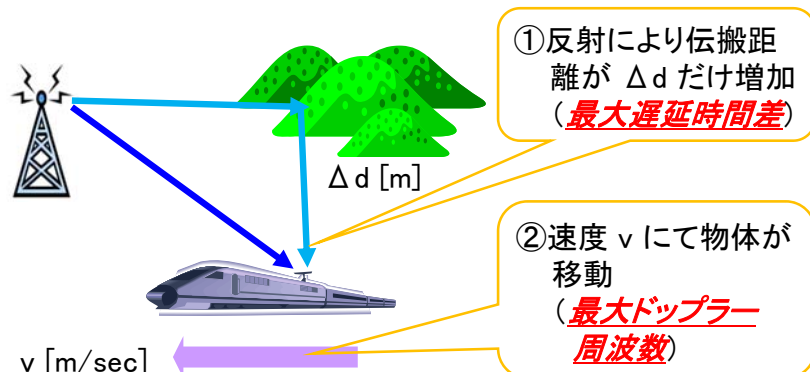
6

移動体通信伝搬路の課題



移動体通信は **ダブルセレクトティブ** という伝搬環境が課題

- ① **周波数選択性** (大きな周波数歪) : 最大遅延時間差
- ② **時間選択性** (高速な時間変動) : 最大ドップラー周波数



7

最大遅延時間と最大ドップラー周波数



最大遅延時間差と最大ドップラー周波数は, 伝搬速度が規定

最大遅延時間差 τ_D

$$\tau_D = \frac{\Delta d}{c}$$

最大距離差

媒体の伝搬速度

最大ドップラー周波数 f_D

$$f_D = \frac{v}{c} f_c$$

移動速度

搬送波周波数

媒体の伝搬速度

媒体の伝搬速度
 光速: $3.0 \times 10^8 \text{m/s}$
 音速 (空間): 340m/s
 音速 (水中): 1500m/s



8

実伝搬環境を想定した数値の一例



最も厳しい電波伝搬環境の一例と音響通信を比較すると:
・音響通信は、電波環境の**約10倍**ダブルセレクトィブが厳しい

パラメータ	電波伝搬	水中音響	陸上音響
最大距離差: Δd	10km	1.5m	0.5m
移動速度: v	150km/h=41.7m/s	3kt=1.54m/s	0.3m/s
キャリア周波数: f_c	400MHz	30kHz	20kHz
最大遅延時間差: τ_D	33.3 μ s	1ms	1.47ms
ドップラー周波数: f_D	55.6Hz	30.8Hz	17.6Hz
$f_D \tau_D$	1.85×10^{-3}	3.08×10^{-2}	2.60×10^{-2}
$f_D T^{*1}$	1.48×10^{-2}	2.46×10^{-1}	2.08×10^{-1}

T: シンボル周期

*1: 遅延差をT/8以下に限定した場合の許容値

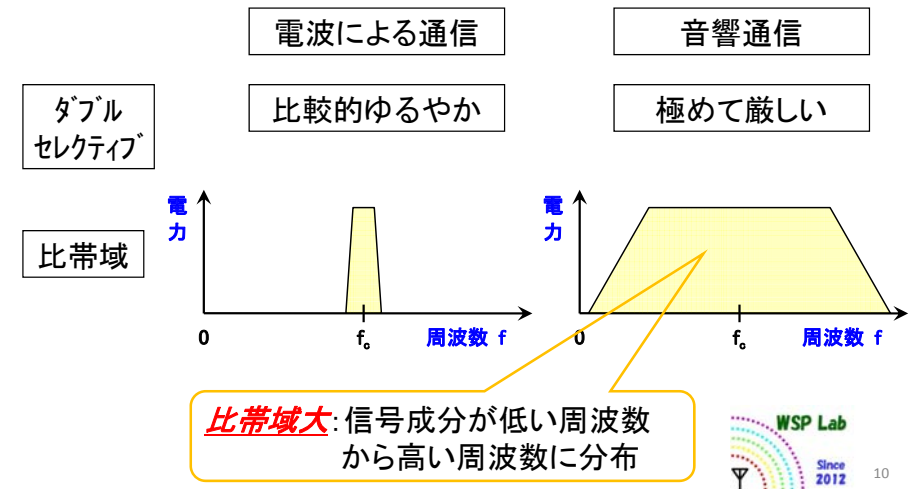


9

音響通信における比帯域の課題



音響通信は、ダブルセレクトィブが厳しいのみでなく、**比帯域が大きい**という課題が存在



10

音響通信の課題と解決策



① 高速に変動する伝搬環境

解決策: **伝送路予測による差動時空符号化*1**

② 極めて大きな比帯域

解決策: **多重シングルキャリア(MSC)伝送方式*1**

③ 水中の多様な通信環境に対応

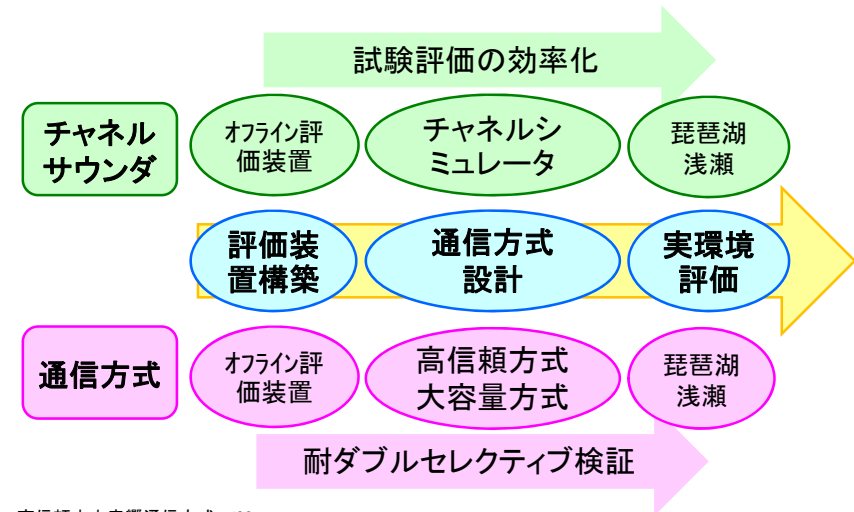
解決策: **音響通信性能評価プラットフォーム(詳細に説明)**

*1: <http://www.ritsumei.ac.jp/~kubohiro/wspl-dstc.pdf>
(差動時空符号化に関する研究成果) 参照



11

水中音響通信の研究戦略



高信頼水中音響通信方式: 8kbps
大容量水中音響通信方式: 64kbps

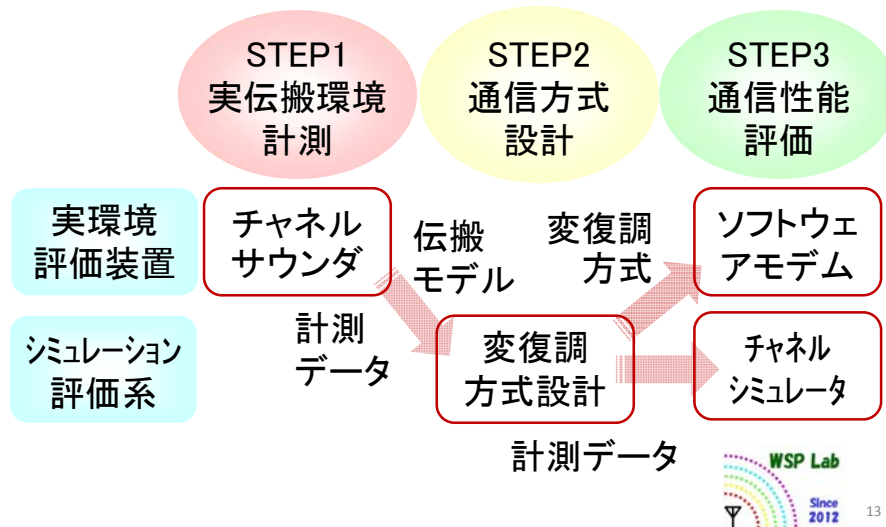


12

音響通信の性能評価手順



3ステップ評価を実施(実環境・シミュレーション評価可能)



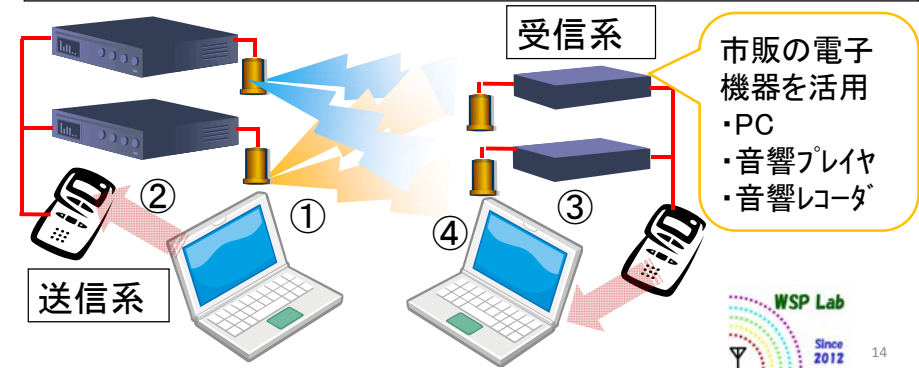
13

音響通信性能評価プラットフォームの概要



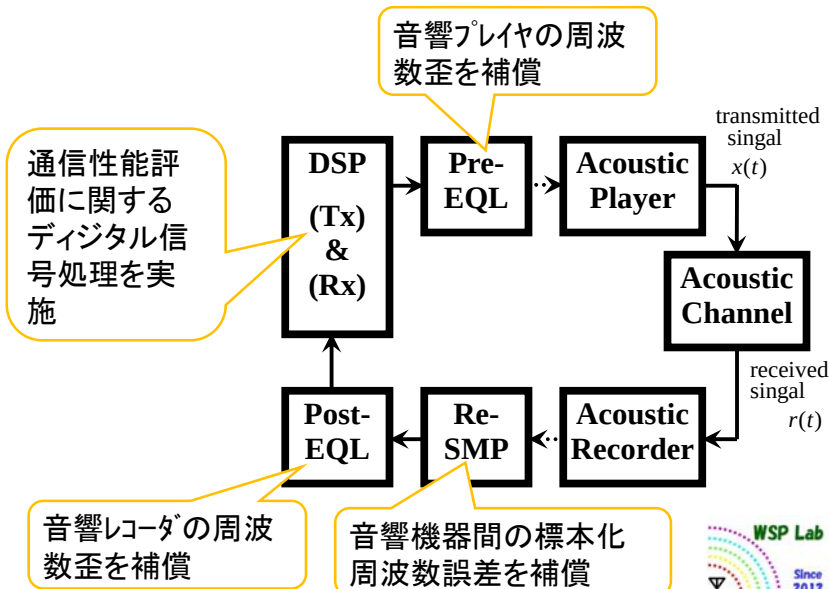
市販の電子機器を活用して音響通信性能を評価

送信系の動作手順: ①PCにて信号をオフライン作成
②音響プレイヤーから信号を送信
受信系の動作手順: ③音響レコーダにて信号を受信
④PCにて信号をオフライン処理



14

音響通信性能評価プラットフォームの構成



15

水中音響通信性能評価の現地設置状況



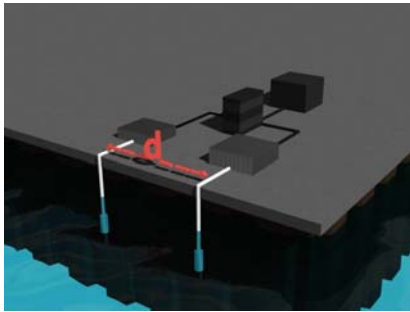
16

琵琶湖浅瀬環境での水中音響通信試験



琵琶湖博物館駐車場横の浅瀬で、次の実環境データを取得

- ①チャンネルサウンダによる **伝搬環境特性** の取得
- ②ソフトウェア無線による **ビット誤り率 (BER) 特性** の取得



試験環境のイメージ

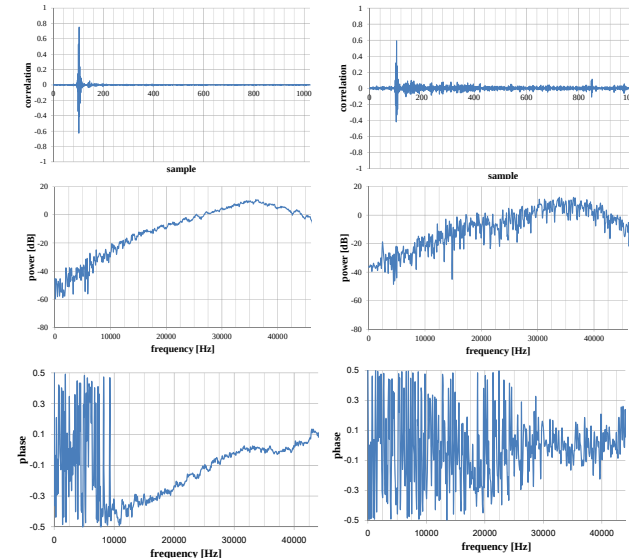


試験環境



17

琵琶湖での実環境試験結果 (伝搬環境1)



伝送路
インパルス応答

振幅
周波数特性

位相
周波数特性

通信距離d: 1m

通信距離d: 20m

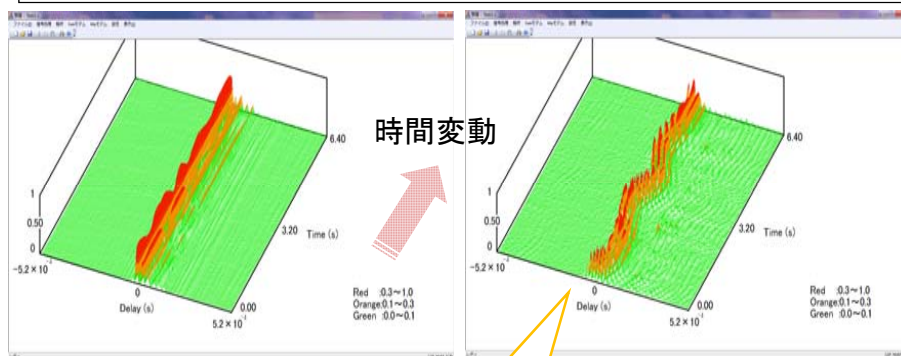


18

琵琶湖での実環境試験結果 (伝搬環境2)



伝送路インパルスの応答の時間変動を3次元で表示可能なツールを開発



時間変動

通信距離d: 1m

通信距離d: 5m

波による揺らぎを検出



19

琵琶湖での実環境試験結果 (BER特性)



琵琶湖博物館駐車場横の浅瀬で、ビット誤り率 (BER) 特性を取得

- ・ソフトウェアモデム: シングルキャリアQPSK遅延検波 (2ブランチ受信ダイバーシチ)
- ・中心周波数: 30kHz

距離d	受信条件	187.5sps	375sps	750sps
1m	ダイバーシチ	エラーフリー	エラーフリー	エラーフリー
2m	ダイバーシチ	3.3×10^{-5}	2.1×10^{-4}	1.5×10^{-4}
5m	ダイバーシチ	1.8×10^{-4}	7.5×10^{-4}	5.5×10^{-4}
10m	ダイバーシチ	2.4×10^{-3}	5.6×10^{-3}	8.1×10^{-3}
15m	ダイバーシチ	3.6×10^{-2}	NG	NG
20m	ダイバーシチ	NG	NG	NG



20

チャンネルサウンダの性能改善



①M系列固有のサイドローブの抑圧

解決策: 変形M系列によるチャンネルサウンド

②使用帯域に限定した伝搬路推定

解決策: (送受独立)帯域制限チャンネルサウンド

③MIMO伝搬環境の伝搬路推定

解決策: MIMOチャンネルサウンド

MIMO : multiple-input multiple-output

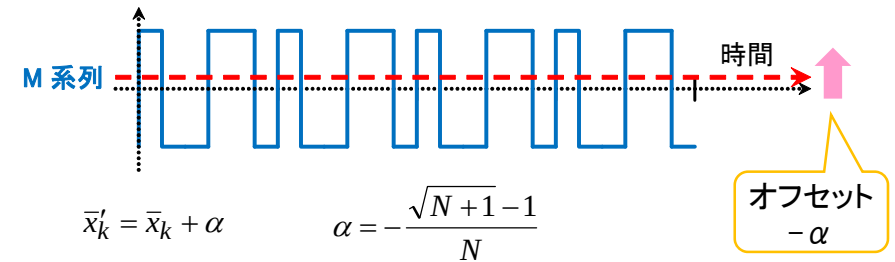


21

①変形M系列によるチャンネルサウンド



M系列の自己相関には、-1なるサイドローブが存在
M系列の振幅にオフセットを与えることで、サイドローブを抑圧可
⇒変形M系列



N: M系列の周期

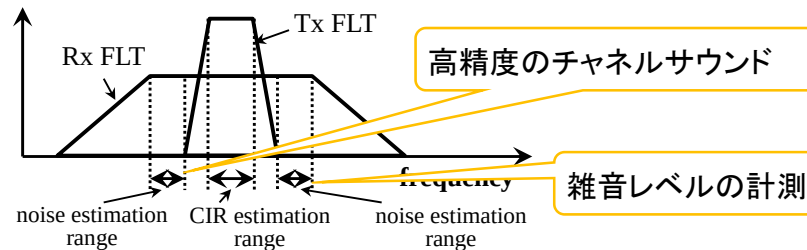


22

②帯域制限チャンネルサウンドの原理



帯域制限により高精度チャンネルサウンドと概略SNR推定を同時実現

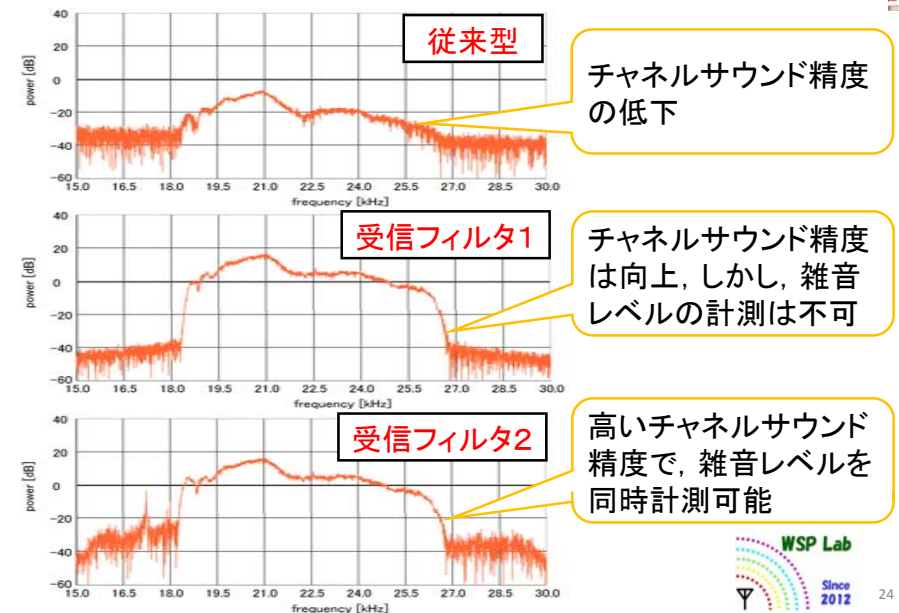


名称	Tx FLT	Rx FLT
従来型	帯域B	無
受信フィルタ1	帯域B	帯域B
受信フィルタ2	帯域B	> 帯域B



23

②帯域制限チャンネルサウンドの効果

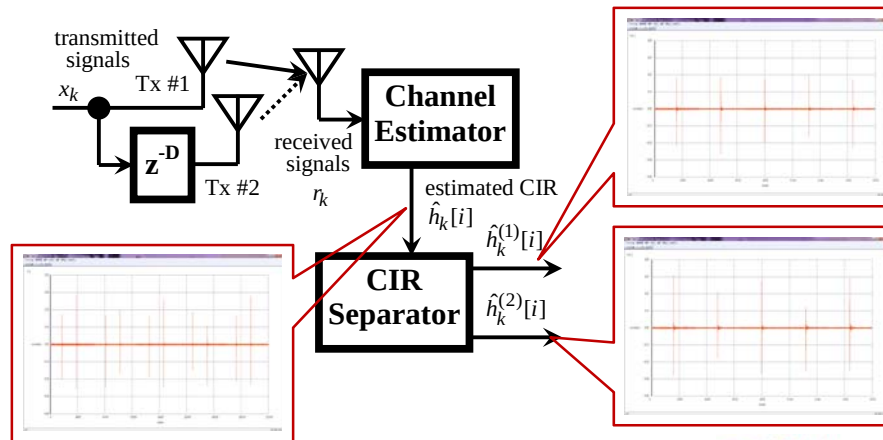


24

③MIMOチャネルサウンダ



送信アンテナからの送信タイミングを異ならせてMIMOのCIRを推定



MIMO : multiple-input multiple-output, CIR : channel impulse response



25

まとめ



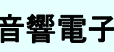
移動体音響通信のための通信方式の検討



通信方式実現上の課題の整理



通信方式の性能評価+性能評価の効率化



性能評価プラットフォームの導入



市販の音響電子機器によるプラットフォームの構築

オフライン信号処理の導入

チャネルサウンダ・BER計測に対応可能



26

研究成果 (1)



【査読付論文】

- (1) H. Kubo, M. Higashinaka and A. Okazaki, "Non-coherent MIMO communication systems employing per transmit antenna differential mapping (PADM)," IEICE Transactions on Communications, vol. E95-B, no. 10, pp. 3242-3251, Oct. 2012.
- (2) 宮崎律子, 湯本菜々瀬, 久保博嗣, "簡易な1次伝送路予測による判定帰還多重遅延検波とその音響通信への応用," Journal of Signal Processing, vol. 20, no. 5, pp. 225-233, Sept. 2016.
- (3) T. Mori, T. Yamagishi, A. Murayama and H. Kubo, "Differential MIMO spatial multiplexing employing PADM based on channel prediction for fast time-varying channels," Journal of Signal Processing, vol. 21, no. 2, pp. 53-62, March 2017
- (4) H. Kubo, T. Yamagishi and T. Mori, "Non-coherent MIMO of per transmit antenna differential mapping (PADM) employing asymmetric space-time mapping and channel prediction," IEICE Transactions on Communications, vol. E100-B, no. 5, pp. 808-817, May 2017.



27

研究成果 (2)



【査読付論文】

- (5) 村山陽寛, 森田宗一郎, 相澤大, 上田俊一, 市川貴英, 久保博嗣, "市販の音響電子機器を用いた水中音響通信用チャネルサウンダとそのフィールド評価結果," Journal of Signal Processing, vol. 21, no. 3, pp. xxx-xxx, May 2017.



28

研究成果 (3)



【国際会議】

- (1) H. Kubo, "A Simple Decision-Feedback Block Differential Detection Scheme for DSTBC," IEEE Vehicular Technology Conference 2014-Spring (VTC2014-Spring), Seoul, Korea, May 2014.
- (2) R. Miyazaki, N. Yumoto, and H. Kubo, "Simple decision-feedback multiple differential detection employing first-order channel prediction and its applications to underwater acoustic communications," RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing 2016 (NCSP' 16), Honolulu, Hawaii, US, pp.439-442, March 2016.
- (3) T. Ichikawa, D. Aizawa, S. Ueda, S. Morita, A. Murayama, and H. Kubo, "A channel sounder employing commercial electronic acoustic equipments and its applications to underwater acoustic communications," RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing 2016 (NCSP' 16), Honolulu, Hawaii, US, pp. 443-446, March 2016.



29

研究成果 (4)



【国際会議】

- (4) A. Murayama, S. Morita, N. Yumoto, and H. Kubo, "Simple channel sounders for underwater acoustic communications in the presence of double selective channel environments," International Symposium on Information Theory and its Applications 2016 (ISITA2016), Monterey, California, US, pp. 598-602, Oct. 2016.
- (5) N. Yumoto, S. Morita, A. Murayama and H. Kubo, "An off-line software MODEM for underwater acoustic communications and its field evaluation results," International Symposium on Information Theory and its Applications 2016 (ISITA2016), Monterey, California, US, pp. 603-607, Oct. 2016.
- (6) S. Nagano, S. Kawai and H. Kubo, "An underwater environment acoustic signal detection scheme employing dual-loop adaptive noise canceling based on analog network coding," International Symposium on Information Theory and its Applications 2016 (ISITA2016), Monterey, California, US, pp. 707-711, Oct. 2016.



30

研究成果 (5)



【研究会他】

- (1) 井本智大, 道尾涼, 森下慎一郎, 久保博嗣, "音響通信の屋内環境ビット誤り率特性に関する一検討," 2014年電子情報通信学会技術研究報告(無線通信システム), RCS2014-34, pp. 13-18, June 2014.
- (2) 宮崎律子, 久保博嗣, "高速フェージングのためのマルチキャリア高次予測判定帰還遅延検波," 2014年電子情報通信学会技術研究報告(無線通信システム), RCS2014-35, pp. 19-24, June 2014.
- (3) 市川貴英, 清水崇司, 相澤 大, 久保博嗣, "音響電子機器を活用した音響通信用のチャンネルサウンダに関する検討," 2014年電子情報通信学会技術研究報告(ワイドバンドシステム), WBS2014-64, pp. 63-68, March 2015.
- (4) 相澤 大, 上田 俊一, 清水 崇司, 市川 貴英, 久保 博嗣, "音響通信用チャンネルサウンダによる実水中伝搬環境計測結果," 2015年電子情報通信学会技術研究報告(無線通信システム), 北海道大学(北海道札幌市), RCS2015-80, pp. 199-204, June 2015.



31

研究成果 (6)



【研究会他】

- (5) 上田 俊一, 相澤 大, 清水 崇司, 市川 貴英, 久保 博嗣, "音響電子機器を用いた水中音響チャンネルサウンダに関する検討," 2015年電子情報通信学会技術研究報告(無線通信システム), RCS2015-81, pp. 205-210, June 2015.
- (6) 森田 宗一郎, 村山 陽寛, 湯本 菜々瀬, 久保 博嗣, "水中音響通信のための音響電子機器を用いたオフラインフィールド評価装置に関する検討," 2015年電子情報通信学会技術研究報告(無線通信システム), RCS2015-227, pp. 221-226, Nov. 2015.
- (7) 村山 陽寛, 森田 宗一郎, 湯本 菜々瀬, 久保 博嗣, "ダブルセレクトティブ伝搬環境に適した水中音響通信用チャンネルサウンダに関する検討," 2015年電子情報通信学会技術研究報告(無線通信システム), RCS2015-231, pp. 245-250, Nov. 2015.
- (8) 湯本 菜々瀬, 森田 宗一郎, 村山 陽寛, 久保 博嗣, "シングルキャリア差動符号化QPSK/遅延検波による実環境水中音響通信でのビット誤り率評価結果," 2015年電子情報通信学会技術研究報告(無線通信システム), RCS2015-232, pp. 251-256, Nov. 2015.



32

研究成果 (7)



【研究会他】

- (9) 長野 翔太, 河合 渉平, 久保 博嗣, : “アナログネットワーク符号化に基づく2重ループ適応雑音除去による水中環境音信号抽出法,” 2015年電子情報通信学会技術研究報告 (無線通信システム), RCS2015-233, pp. 257-256, Nov. 2015.
- (10) 吉田 成利, 三浦 和人, 安部 哲也, 村山 陽寛, 森田 宗一郎, 湯本 菜々瀬, 市川 貴英, 宮崎 律子, 久保 博嗣, : “非可聴周波数帯音響通信の駅構内実環境評価結果,” 2015年電子情報通信学会技術研究報告 (無線通信システム), RCS2015-304, pp. 143-148, Jan. 2016.
- (11) 森 俊樹, 山岸 拓真, 久保 博嗣, : “高速時変伝送路変動に有効な伝送路予測に基づくPADMIによる差動MIMO空間多重方式,” 2016年電子情報通信学会技術研究報告 (無線通信システム), RCS2016-100, pp. 35-40, July 2016.
- (12) 森田 宗一郎, 村山 陽寛, 久保 博嗣, : “M系列を用いた水中音響通信路のための伝送路インパルス応答と雑音の同時推定法,” 2016年電子情報通信学会技術研究報告 (無線通信システム), RCS2016-131, pp. 13-18, Aug. 2016.



33

研究成果 (8)



【研究会他】

- (13) 湯本 菜々瀬, 村山 陽寛, 久保 博嗣, : “高速時変伝送路に有効なPer-Survivor Processingに基づく1次予測多重遅延検波,” 2016年電子情報通信学会技術研究報告 (無線通信システム), RCS2016-149, pp. 113-117, Aug. 2016.
- (14) 村山 陽寛, 湯本 菜々瀬, 久保 博嗣, : “多値PSKを用いたDSTBCのための判定帰還ブロック遅延検波,” 2016年電子情報通信学会技術研究報告 (無線通信システム), RCS2016-150, pp. 119-124, Aug. 2016.
- (15) 森 俊樹, 山岸 拓真, 久保 博嗣, : “厳しいダブルセレクトティブフェージングに有効なマルチキャリア差動MIMO空間多重,” 2016年電子情報通信学会技術研究報告 (無線通信システム), RCS2016-152, pp. 131-136, Aug. 2016.
- (16) 久保博嗣, 村山陽寛, 森田宗一郎, 湯本菜々瀬, 中塚真衣, 竹村真志, 松本侑亮, 中務光基, : “ダブルセレクトティブ音響伝送路用MIMOチャネルサウンダとそのチャネルシミュレータへの応用,” 2016年電子情報通信学会技術研究報告 (無線通信システム), RCS2016-326, pp. 205-210, March 2017.

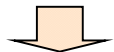


34

まとめと今後の予定

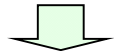


移動体音響通信のための通信方式を検討中



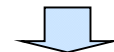
性能評価装置の実現

M系列を用いたチャネルサウンダの性能改善



より効率的な性能評価の実施

チャネルシミュレータによる性能評価



移動体音響通信方式の実装

琵琶湖浅瀬環境での性能評価の実施



35