

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 13 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420376

研究課題名(和文)無線通信回路規模を考慮した適応信号処理に関する研究

研究課題名(英文) Research on wireless transceiver-circuit complexity aware adaptive signal processing

研究代表者

牟田 修 (MUTA, OSAMU)

九州大学・日本エジプト科学技術連携センター・准教授

研究者番号：80336065

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：複数のアンテナ素子を有するMIMO無線通信では、基地局装置の小型・低消費電力化が重要な課題となる。本研究では、MIMO送受信回路の小型・低消費電力化のための適応信号処理技術を開発する。MIMO受信回路におけるAD変換器の回路面積を縮小化することで小型・低消費電力化を図るとともに、AD変換時の量子化誤差の影響を軽減する方式を提案した。また、MIMO空間分割多重システムにおいてアンテナ素子あたりの送信ピーク出力を軽減する手法を低減する線形プリコーディング方式を提案した。さらにRF回路を簡素化させたスペクトルセンシング技術等を検討した。それらの有効性を計算機シミュレーションにより示した。

研究成果の概要(英文)：In Multi-Input Multi-Output wireless communication systems, it is important to reduce hardware size and required power consumption at the transceiver circuits. In this research, we aim to develop efficient signal processing techniques to simplify the transceiver circuits. We proposed to use a low resolution analog-to-digital (A/D) converter (ADC) and related analog hardware designs to reduce the required analog hardware complexity at the receiver circuits. Then, to mitigate the nonlinearity of low-resolution ADC, we proposed nonlinearity mitigation techniques for low-resolution A/D conversion. In addition, we proposed a peak-power-aware linear-precoding scheme for MIMO-spatial multiplexing systems, where the precoder is designed to mitigate the peak output power at each antenna element. Furthermore, compressed sensing techniques are proposed for hardware-complexity reduced spectrum sensing. The effectiveness of the proposed techniques were clarified by computer simulation.

研究分野：無線通信

キーワード：無線通信 MIMO A/D変換器 適応信号処理

1. 研究開始当初の背景

MIMO (Multi-Input Multi-Output) 無線通信において基地局の小型・低消費電力化を図るには、送信電力増幅器の電力利用効率を改善することに加えて、Analog-to-Digital (A/D) 変換器などを含めたアナログ処理部の簡素化とそれに適したデジタル処理部の開発が必須となる。ところで、無線通信システムでは帯域外輻射電力に対する要求が厳しく、送信電力増幅器に対して高い線形性が求められる。そのため、増幅器における非線形歪みの発生を抑えるために、増幅器に入力される信号の (PAPR: Peak to Average Power Ratio) が低いことが重要となる。また、MIMO システムにおいて受信機のアナログ回路規模は軽減するには、非線形歪みの影響を抑えながら、A/D 変換器(ADC) の分解能をできるだけ削減することが有効である。

以上から、MIMO システムにおいて、送信電力増幅器の電力効率改善のためにアンテナ素子あたりのピーク電力を低減すること、および受信機の回路規模軽減のために低分解能 A/D 変換の導入について検討する必要がある。

2. 研究の目的

本研究課題では、MIMO 無線伝送を対象として、基地局装置の小型・低消費電力化のための適応信号処理技術を開発することを目的とする。送信機と受信機の双方において伝搬路情報を利用する MIMO 空間分割多重システムにおいてアンテナ素子送信ピーク出力を軽減する線形プリコーディング技術を示した。また、MIMO 受信回路における A/D 変換器の回路面積を縮小化することで小型・低消費電力化を図るとともに、A/D 変換時の量子化誤差の影響を軽減する方式を提案した。さらに、RF 回路を簡素化させた低消費電力の広帯域協調センシング技術やマルチメディア情報のための A/D 変換技術についても検討した。

3. 研究の方法

(1) MIMO 伝送におけるピーク電力を考慮した線形プリコーディング技術

送受信双方で複数のアンテナ素子を用いる MIMO システムでは、複数のデータストリームを空間的に多重して伝送することで、伝送速度の高速化が可能となる。これは空間分割多重(SDM: Space Division Multiplexing)と呼ばれ、周波数利用効率を改善する技術として有効である。MIMO-SDM において、送受双方で空間フィルタリングを適用して信号分離を行う手法が知られている。しかし、伝搬路特性が時間変動する場合、送受信の空間フィルタ係数をチャネル特性の時間変動に応じて追従制御することが求められる。

送信側で空間フィルタを用いる MIMO 空間多重システムでは一般的に、各アンテナの重み係数は総送信電力を一定値以下とする

制約条件のもとで最適化される。しかしながら、アンテナ素子毎の送信電力の最大値が考慮されないため、アンテナ素子間で送信出力の偏りが生じた場合に送信ピーク電力の上昇を招く。送信信号のピーク電力を考慮する場合、通信品質を維持しつつ、各アンテナ素子における送信電力を増幅器の出力可能値以下に制限することが望ましい。アンテナ素子当りの送信電力を適切に制限するには、ストリーム間の直交性と雑音の影響を同時に考慮することが重要となる。

本研究では、送受信で空間フィルタを用いる MIMO システムにおいて、アンテナ素子当りの送信電力制限を考慮した送信重み係数の制御手法を示した。送受信信号間の平均二乗誤差を評価基準として、これをアンテナ素子当りの送信電力制限下において最小化することにより重み係数を最適化するものである。これにより、通信品質を維持しつつ、アンテナ毎のピーク電力を抑圧できることを示した。また、MIMO/FDD システムにおいて、下り回線における伝搬路変化量を上り回線において周期的に帰還する方式を示した。送受信の空間フィルタ係数を伝搬路特性の時間変動に応じて追従制御することで提案方式を時変伝搬路環境に適用できる。

(2) 低分解能 A/D 変換器を用いる無線通信受信機における非線形歪みの軽減技術

無線基地局の小型化・低消費電力化を図るには、送信電力増幅器の電力効率改善や受信アナログ回路規模の軽減等が求められる。送信電力増幅器の電力効率を改善するには、その入出力特性の線形性を高めることに加えて、ピーク電力対平均電力比 (PAPR) の低い変調方式を用いることが重要である。したがって、送信電力増幅器の電力効率の観点からはシングルキャリア変調方式を用いることが望ましい。本検討では、PAPR の低いシングルキャリア変調方式として Offset-QAM (OQAM) 方式に着目する。OQAM とは位相遷移に制約を加え零点を通過しないようにした QAM 方式であり、信号軌跡が零点を通過しないことから包絡線変動を抑え、QAM よりも低 PAPR を達成できる。

一方、受信機の小型・低消費電力化の観点からは、アナログ回路、特にアナログ-デジタル(A/D: Analog-to-Digital Converter) 変換器の小型化が重要となる。A/D 変換器の回路規模はその分解能 (量子化ビット数) に依存する。A/D 変換時の分解能が低い場合、非線形歪み (量子化雑音) が増加するため、非線形歪みの大きさと回路規模とのトレードオフを考慮した回路設計およびその非線形歪みの影響を軽減する検討が求められる。従来、A/D 変換器における非線形歪みの影響を軽減する手法として、ディザと呼ばれるランダムな信号を A/D 変換器の入力に重畳した上で量子化する方法が知られている。この方式では、A/D 変換器において生じる量子化雑音

を白色化し、その影響を軽減する効果を得ることができる。

ところで、A/D 変換器はアナログ素子に起因する非理想性を有しており、その一つとして比較器におけるヒステリシス効果が知られている。これは A/D 変換器の比較器において、その出力の一部が入力に正帰還される現象であり、これらの非理想性の影響を抑えるように回路設計を行うことが求められる。本研究では、比較器におけるヒステリシスを非理想性の一種とみなすのではなく、それらを積極的に利用することで 1bit A/D 変換器の比較器における非線形性を軽減する手法（ヒステリシス ADC）を提案した。比較器におけるヒステリシスを応用することで、回路規模の増加を抑えながら A/D 変換時の非線形歪みの影響を軽減するものである。さらに、低分解能 A/D 変換時の非線形歪みの影響を軽減する手法として、伝搬路における符号間干渉と A/D 変換時の量子化誤差の両方を同時に補償する非線形等化手法を提案した。

(3) その他

RF 回路の A/D 変換部の回路規模を軽減するために圧縮センシングに基づくスペクトルセンシング技術を提案した。協調スペクトルセンシングでは、センシング処理を複数の端末に分散させて実施し、その結果を Fusion Center (FC) に通知する。Primary User (PU) 信号の検出確率の改善を図るために、Reporting Channel の SNR に応じて複数の端末にセンシング処理を分散実行させる手法を提案した。また、信号の周期定常性を応用したスペクトルセンシング手法も提案した。

通信システムにおけるマルチメディア情報伝送を対象とした圧縮センシングに基づくアナログ/情報変換技術を提案した。有限ビット量子化時に提案手法を拡張し、その効果を示した。

4. 研究成果

(1) MIMO 伝送におけるピーク電力を考慮した線形プリコーディング技術

検討システムの構成を図 1 に示す。 $\mathbf{F}(\omega)$ はルートレイズドコサインフィルタの周波数伝達特性である。 \mathbf{H} は $M \times N$ MIMO 伝搬路行列、 $\hat{\mathbf{H}}$ は \mathbf{H} の推定値を表す。仮想受信信号 $\hat{\mathbf{Y}}$ と送信信号 \mathbf{X} の誤差関数は、 $\mathbf{e}(\mathbf{W}_t) = \mathbf{X} - \hat{\mathbf{Y}}$ で与えられる。

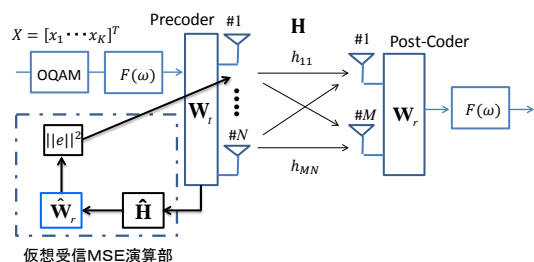


図 1. 検討 MIMO システムの構成

下式の通り、アンテナ素子当りの最大出力電力値と総送信電力値が制約された条件の下で、仮想的に求めた受信点での平均二乗誤差 (MSE) を最小にする送信重み \mathbf{W}_t を求める。

$$\begin{aligned} & \text{Minimize} \quad E[\|\mathbf{e}(\mathbf{W}_t)\|^2] = E[\|\mathbf{X} - \hat{\mathbf{Y}}\|^2] \\ & \text{subject to} \quad \sum_{i=1}^N |w_{ij}|^2 \leq P_{\max} \\ & \quad \quad \quad \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^K |w_{ij}|^2 \leq P_{\max} \end{aligned}$$

ここで、 p_{\max} はアンテナ素子当たりの平均出力電力の上限値、 P_{\max} 平均総送信電力の上限値とする。また、 w_{ij} は \mathbf{W}_t の (i,j) 成分であり、送信信号 x_i に対して乗算される送信アンテナ # j の送信重みを表す。本検討では簡単のため、伝搬路行列 $\hat{\mathbf{H}}$ は送信側において既知とする。送信機における仮想受信 MSE 演算部では、受信点における平均二乗誤差と受信重み $\hat{\mathbf{W}}_r$ を仮想的に求め、それを最小化させる送信重み \mathbf{W}_t を反復的に求める。受信機では、最小二乗誤差 (MMSE) 規範による空間フィルタリング(信号分離)を行う。

アンテナ素子当りの送信可能電力の制限下において、提案方式の特性を計算機シミュレーションにより評価する。比較方式として、線形スケールリング(Liner Scaling)を適用した固有モード伝送(E-SDM)の特性を評価する。線形スケールリング方式は、固有モード伝送におけるストリーム間の直交性を崩さないように(アンテナ当りの最大出力値が制限値以下となるように)総送信電力を低減させる方式である。送信アンテナ $M=4$ 、受信アンテナ $N=2$ である MIMO 一様レイリーフェージング伝搬路、アンテナ間のフェージング相関は無相関とする。アンテナ当たりの正規化最大出力値を $\gamma (= p_{\max} / P_{\max})$ と定義する。アンテナ素子当たりの出力制約がない場合、 $\gamma=1$ となる。変調方式を OQPSK、送信ストリーム数を 2 とする。

図 2 はアンテナ当たりの許容平均出力で正規化された瞬時電力値の相補累積分布関数 (CCDF) を示す。送信フィルタのロールオフ係数を 0.5 および 1.0 とする。提案手法($\gamma=0.25$)を用いることで、CCDF= 10^{-4} における瞬時電力値を固有モード伝送時($\gamma=1$)と比べて低減できることがわかる。

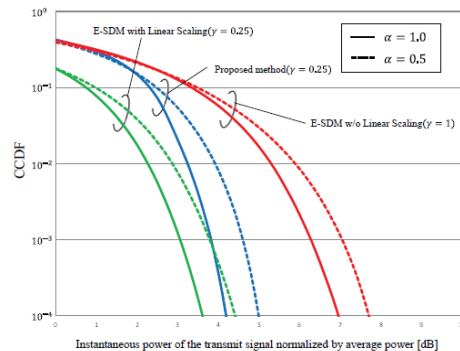


図 2. アンテナ当たりの送信信号の瞬時電力値の補累積分布(CCDF)

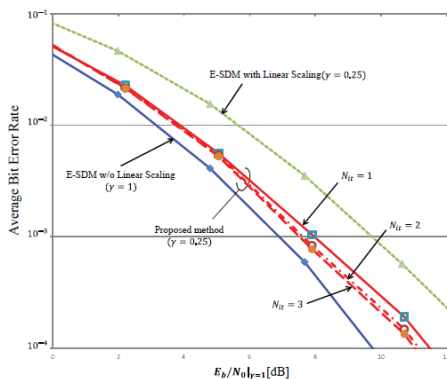


図3. BER 特性評価(4x2MIMO-SDM システム)

本検討ではアンテナ当りの出力制約がない ($\gamma = 1$) の場合の E_b/N_0 値を $E_b/N_0|_{\gamma=1}$ と定義する。ここで、 E_b はビット当たりのエネルギー、 N_0 は雑音電力密度を表す。図3に、 $E_b/N_0|_{\gamma=1}$ に対するビット誤り率 (BER) 特性を示す。比較方式として、線形スケールリングを用いる固有モード伝送の BER 特性を示す。ここで、固有モード伝送では線形スケールリングとは独立に BER 再送化基準に基づく最適電力制御を各ストリームに対して適用している。図5より、提案手法 ($\gamma=0.25$) を用いることで、 $BER=10^{-3}$ において線形スケールリング方式を用いる場合に比べて特性が改善されることがわかる。

(2) 低分解能 A/D 変換器を用いる無線通信受信機における非線形歪みの軽減技術

本研究では、MIMO システムにおけるシングルキャリア方式として PAPR の低いオフセット QAM (OQAM) に関して評価を行う。また、受信アナログ回路の簡素化の観点から、IF (Intermediate Frequency) サンプリング方式の低分解能 A/D 変換器を採用する。以下では、シングルキャリア OQAM システムにおいて、低分解能 A/D 変換器を受信機で用いる場合の非線形歪みの影響を軽減する手法について述べる。

① 検討システムおよび量子化誤差を考慮した MLSE 方式の構成

検討システムの構成を図4に示す。送信信号として OQAM を用いる。受信アナログ回路の簡素化の観点から IF (Intermediate Frequency) サンプリング方式の低分解能 A/D 変換を行う。受信機の A/D 変換器の分解能が低い場合、量子化誤差による特性劣化を生じる。本検討では、低分解能 A/D 変換時の非線形歪みの影響を軽減する手法として、伝搬路における符号間干渉と A/D 変換時の量子化誤差の両方を同時に補償する最尤系列推定 (MLSE : Maximum Likelihood Sequence Estimation) を用いた。図5に検討 MLSE 方式の構成図を示す。この方式では、量子化誤差推定を行いその影響を軽減すること、および

等化器の推移可能な状態数に制約を加えて計算量の削減を行うことの2点が特長であり、それ以外は従来の MLSE 等化技術と同様である。本方式の詳細は学会発表論文[2]等に記載されている。

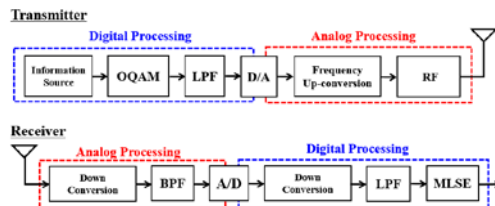


図4. システム構成

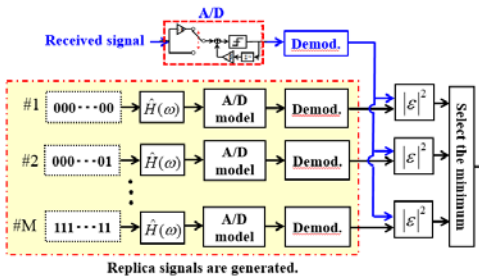
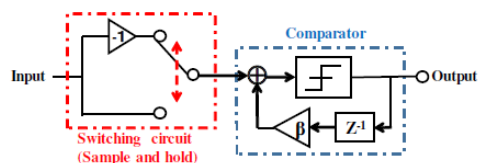


図5. 量子化誤差を考慮した MLSE の構成

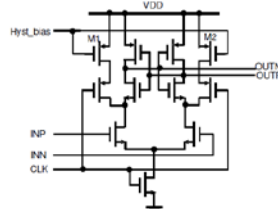
② ヒステリシス効果を応用する A/D 変換方式 (ヒステリシス ADC)

低分解能 A/D 変換器を用いる受信機における非線形歪みの影響を軽減する手法として、ヒステリシス効果を応用した A/D 変換技術を提案する。以下で方式の概要を述べる。

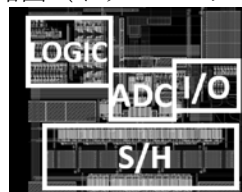
1bit 分解能 A/D 変換器の比較器において、出力の一部が入力に正帰還される現象はヒステリシスと呼ばれる。我々は、比較器のヒステリシスの影響を積極的に利用し、1bit 分解能 A/D 変換器の非線形性を抑えた 1bit 分解能 A/D 変換器を提案する。ヒステリシス



(a) A/D 変換器の構成



(b) 回路図 (トランジスタモデル)



(c) 設計したレイアウトマスクパターン
図6. ヒステリシス A/D 変換器の構成

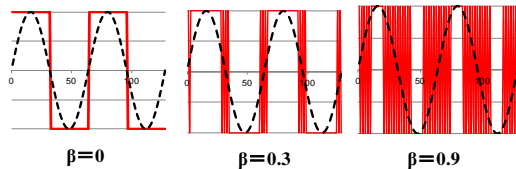


図 7. ヒステリシス A/D 変換器の入出力波形 (黒: 入力、赤: 出力)

を応用した A/D 変換器 (ヒステリシス A/D 変換器) の構成を図 6 に示す。図 6(a) に示すように、ヒステリシスの大きさを外部からコントロールできる回路構成とし、その大きさを表すパラメータを β とする。また提案方式では、サンプルホールド回路の接続の信号パスを切り替えることで、通常のヒステリシスの符号を反転させることが特徴である。ヒステリシス A/D 変換器のトランジスタモデルを図 6(b) に示す。また、ヒステリシス機能を有する 1bit 分解能 A/D 変換器の設計例 (レイアウトマスクパターン) を図 6(c) に示す。ヒステリシス A/D 変換器の入出力の一例を図 7 に示す。図 7 に示す通り、通常のヒステリシスの符号を反転させ、 β の値により入力への帰還量を制御することで、A/D 変換器の出力状態が変化することを確認できる。 $0 < \beta < 1$ の場合、A/D 変換器の量子化出力のとり得る状態数を、回路規模の増加を抑えながら、増加できることがわかる。提案方式 (ヒステリシス A/D 変換) は複数ビット量子化時にも適用可能である。

オフセット QPSK (OQPSK) およびオフセット 16QAM (O16QAM) の受信機に提案方式を適用した場合の BER 特性 (シミュレーション結果) を図 8, 9 にそれぞれ示す。伝搬路モデルとして、等レベル 6 波レイリーフェージング伝搬路を仮定する。A/D 変換器の量子化ビット数を 1, 2, 3 ビットとする。OQPSK および O16QAM のいずれの場合においても、ヒステリシスを応用した提案方式を適用することで、提案方式を用いない場合に比べて BER 特性を改善できる。また、ヒステリシスの無い場合と比べても特性が改善されることがわかる。

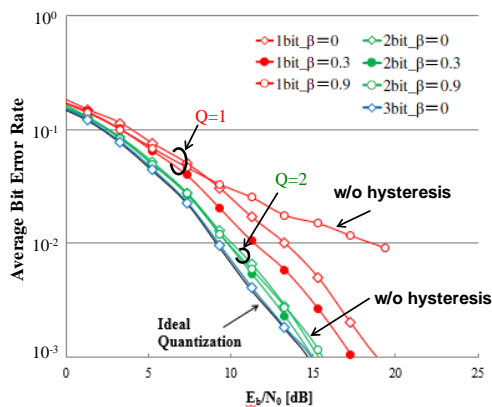


図 8. BER 特性 (QPSK)

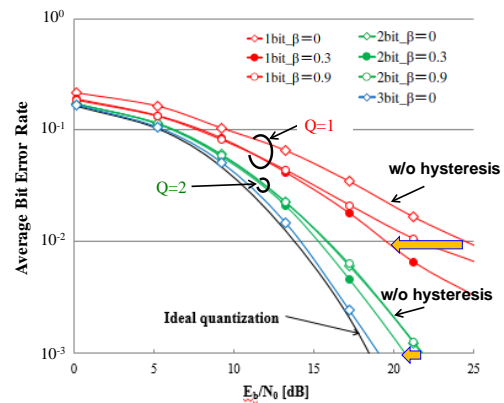


図 9. BER 特性 (16QAM)

提案手法は複数ビット A/D 変換時に拡張可能であり、その効果を確認できる。以上の結果は、提案方式は低分解能 A/D 変換時の BER 特性の改善に有効であり、非線形歪みの影響をより軽減できることを示している。

この他、RF 回路の A/D 変換部の回路規模を軽減するために圧縮センシングに基づくスペクトルセンシング技術等についてシミュレーション評価を行い、有効性を示した。それらの結果は国際会議等で発表している。本原稿における研究成果に関して、現在は論文として公表するための準備を進めている。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① Sawsan Elsayed, Maha ElSabrouty, Osamu Muta and Hiroshi Furukawa, Model-based quantization for perceptually weight-ed compressed video sensing, IEICE Communications Express, 2016 年 5 月.
- ② Sawsan Elsayed, Maha ElSabrouty, Osamu Muta, and Hiroshi Furukawa, Perceptual-based Compressed Video Sensing, IEICE Communications Express, Vol. 4 No. 8, pp.251-257, 2015 年 8 月.

[学会発表] (計 20 件)

- ① 兼本大輔, 牟田 修, 福永龍太, 古川 浩, 金谷晴一, 吉田 啓二, 定包絡線変調受信機のための 1bit 量子化 A/D 変換器の構成と試作評価, 電子情報通信学会 無線通信システム研究会, 2013 年 4 月.
- ② R.Fukunaga, O.Muta, and H.Furukawa, Effects of MLSE Equalization for Constant Envelope Modulation Signals Affected by ADC Nonlinearity, International Conference on Information Networking (ICOIN2014), Feb. 2014.
- ③ 高島聖, 牟田修, 古川浩, 空間分割多重伝送におけるアンテナ素子当たりの最大出力を考慮した送信重み制御手法の検討 (1), 電子情報通信学会 通信方式研究会, 2014 年 3 月.
- ④ 大木雄介, 高島聖, 牟田修, 古川浩, 空

- 間分割多重伝送におけるアンテナ素子当たりの最大出力を考慮した送信重み制御手法の検討(2), 電子情報通信学会 通信方式研究会, 2014年3月.
- ⑤ Mohammed Farrag, Osamu Muta, Mostafa El-Khamy, Hiroshi Furukawa, and Mohamed El-Sharkawy, Wide-Band Cooperative Compressive Spectrum Sensing Using Distributed Sensing Matrix for Cognitive Radio Systems, 電子情報通信学会 通信方式研究会, 2014年3月.
- ⑥ 兼本大輔, 牟田修, 古川浩, 佐藤隆英, 大木真, 1bit分解能A/D変換器を用いた無線機の検討, 電気学会 電子回路研究会, 2014年3月.
- ⑦ Daisuke Kanemoto, Osamu Muta, Hiroshi Furukawa, Takahide Sato and Makoto Ohki, A Novel Idea of One Bit Resolution ADC for Small Analog Hardware Wireless Receivers, IEEE Symposium on Low-Power and High-Speed Chips (COOL Chips XVII), April 2014 (Best Poster Award 受賞).
- ⑧ Daisuke Kanemoto, Osamu Muta, Hiroshi Furukawa, Takahide Sato, and Makoto Ohki, Linearity Enhancement Technique for one bit A/D converter in wireless communication devices, International Symposium on Consumer Electronics 2014, June 2014.
- ⑨ 大木雄介, 牟田修, 古川浩, 空間分割多重伝送におけるアンテナ素子当たりの最大出力を考慮した送信重み制御手法の検討(3), 電子情報通信学会 通信方式研究会, 2014年7月.
- ⑩ 兼本大輔, 牟田修, 古川浩, 金谷晴一, 大木真, IFサンプリング1bitA/D変換方式を採用した無線受信機の構成検討と試作による評価, 第27回回路とシステムワークショップ, 2014年8月.
- ⑪ 福重翔太, 牟田修, 兼本大輔, 古川浩, “シングルキャリア伝送におけるコンパレータヒステリシスを考慮したA/D変換器の非線形歪み軽減手法と特性評価,” 電子情報通信学会 無線通信システム研究会, 2014年10月.
- ⑫ Mohammed Farrag, Osamu Muta, Mostafa El-Khamy, Hiroshi Furukawa and Mohamed El-Sharkawy, Wide-Band Cooperative Compressive Spectrum Sensing for Cognitive Radio Systems using Distributed Sensing Matrix, IEEE Vehicular Technology Conference Fall, Sept. 2014.
- ⑬ Satoshi Takabatake, Osamu Muta, and Hiroshi Furukawa, “A Peak Power Aware Linear-Precoding Scheme for MIMO-SDM Systems, IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC) 2014, Sept. 2014.
- ⑭ 福重翔太, 牟田修, 兼本大輔, 古川浩, デジタル通信受信機へのヒステリシスA/D変換器の適用と特性評価、電子情報通信学会 通信方式研究会、2015年2月.
- ⑮ Osamu Muta, Daisuke Kanemoto, Syota Fukushige, and Hiroshi Furukawa, Effect of Linearity Enhancement in A/D Conversion for Single Carrier Transmission Systems, IEEE Vehicular Technology Conference Spring 2015, May 2015.
- ⑯ Hossam Kasem, Osamu Muta, Maha Elsabrouty, and Hiroshi Furukawa, Cyclostationary Detection for Spectrum Sensing using Feature-Based Compressive Sensing, 電子情報通信学会無線通信システム研究会, 2015年5月.
- ⑰ [招待講演] Osamu Muta, Peak-amplitude-aware Precoded MIMO Systems, IEICE Information and Communication Technology Forum 2015, June 2015.
- ⑱ Hossam M.Kasem, Maha Elsabrouty, Osamu Muta and Hiroshi Furukawa, Performance of Perceptual 1-Bit Compressed Sensing for Audio Compression, IEEE International Symposium on Computers and Communications 2015, July 2015.
- ⑲ 大木雄介, 牟田修, 古川浩, MIMOシステムにおけるピーク振幅を考慮した線形プリコーディングの検討, 電子情報通信学会無線通信システム研究会 2015年8月.
- ⑳ [招待講演] 牟田修, マルチキャリア信号の適応ピーク振幅抑圧技術, 電子情報通信学会 無線通信システム研究会 2015年8月.

〔産業財産権〕

○出願状況 (計1件)

名称: 1ビットA/D変換器、それを用いた受信機及び無線通信システム

発明者: 兼本大輔 牟田修

権利者: 国立大学法人山梨大学

種類: 特許

出願番号: 特願 2014-181162

出願年月日: 平成 26年 9月 5日

公開番号: 特開 2016-058775

公開年月日: 平成 28年 4月 21日

国内外の別: 国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

牟田修 (MUTA, Osamu)

九州大学・日本エジプト科学技術連携センター・准教授

研究者番号: 80336065

(2) 研究分担者

兼本大輔 (KANEMOTO, Daisuke)

山梨大学・総合研究部・助教

研究者番号: 90603332

(3) 連携研究者

古川浩 (FURUKAWA, Hiroshi)

九州大学・システム情報科学研究所・教授

研究者番号: 60260725