

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月 20日現在

機関番号：13601

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2008～2011

課題番号：20760248

研究課題名（和文）MIMO コグニティブ無線における送信アンテナ数を認知するための実験的検討

研究課題名（英文）Experimental Study of Specifying the Number of Parallel Transmitted Signals in MIMO and Cognitive Wireless Communication.

研究代表者

田久 修（TAKYU OSAMU）

信州大学・工学部・助教

研究者番号：40453815

研究成果の概要（和文）：

無線通信において周波数資源の枯渇が問題とされている。そこで、同一周波数資源での並列伝送を可能にする MIMO 技術と、環境認識と適合能力を有するコグニティブ無線を融合し、周波数資源の高効率運用が可能になる。しかし、MIMO 技術では、空間上に同時に伝送された信号数（並列伝送数）をあらかじめ特定する手法が必要になる。本研究課題では、並列伝送数識別法の実験的検証をとおり、実用化に向けた技術要件を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

The shortage of frequency spectrum is serious problem. Recently, MIMO and Cognitive Radio are attracting much attention. In MIMO, the parallel transmission in single frequency channel can be constructed. In cognitive radio, the accurate recognition and adaption to wireless communication environment are available. MIMO and Cognitive radio are powerful for achieving the high efficiency of frequency usage. In MIMO, the number of transmitted signals in the channel should be specified. In this report, the technique for specifying the number of transmitted signals is considered. In the experiment of the actual equipment, the requirement of implementation for it is clarified.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2009年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2010年度	200,000	60,000	260,000
2011年度	100,000	30,000	130,000
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：無線通信工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・通信・ネットワーク工学

キーワード：移動体通信

1. 研究開始当初の背景

無線通信システムの多様化が進み、無線通信資源である周波数帯域が各システムに個別に割り当てられている。そのため、周波数資源が枯渇する問題に直面している。近年、Multi-Input Multi-Output (MIMO) 技術における信号分離技術を駆使することで、送信

アンテナ数を増やすだけで、同一周波数資源を利用しながら、複数の情報を並列伝送できる。一方、周波数資源の瞬時の利用状況を検出、不活性な周波数資源を探索し、積極的に利用するコグニティブ無線がある。そこで、コグニティブ無線と MIMO 技術を併用することで、新たなる空間領域についての不活性

な周波数資源を発見することができ、周波数利用効率を究極までに高めることができる。しかし、MIMOの信号分離技術には、除去できる同時伝送の最大数が与えられているため、新たにシステムが同時伝送するための可否は、既存システムが同時に伝送している並列送信数から決定される。そのため、コグニティブ無線システムは事前に既存システムの並列送信数を推定することで、既存システムの分離能力を評価し、自局の並列伝送数を適切に制御しなければならない。

2. 研究の目的

本研究課題では、既存システム（プライマリシステム：PS）と2次システム（セカンダリシステム：SS）が空間共有をする無線システムを想定している。本システムでは、PSが複数のアンテナにおいて、信号を並列伝送する際に、動的に切り替わる並列伝送数をSSが特定し、SS側において適切な並列伝送数に設定する。そこで、SSがPSの並列伝送数を特定する検出法を検討し、実機による実験評価を通し、その実現の可能性、さらには技術的な要件を明らかにする。

本研究課題を実施するにあたり、下記個別課題を設定し、それぞれを段階的に実施する。

- (1) 信号点遷移量規範による並列本数識別法
- (2) 機械学習を用いた並列本数識別法
- (3) MIMO 送信アンテナ本数推定におけるFPGA実機検証の基礎検討
- (4) MIMO 空間共有によるSSの加入によるスループット改善量評価

なお、本研究課題を進めるにあたり、関連する研究成果が得られたので、研究結果の最後に報告する。

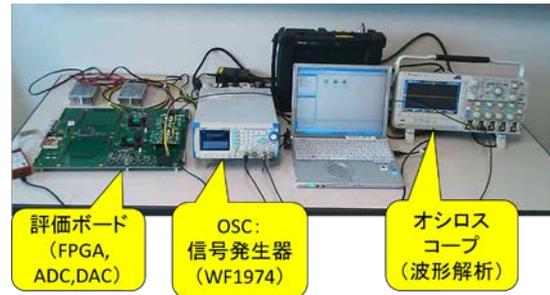
3. 研究の方法

- (1) 信号点遷移量規範による並列本数識別法

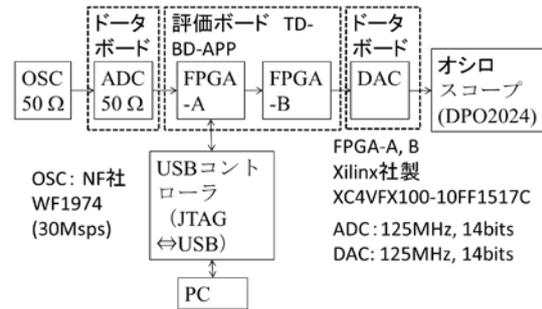
MIMOシステムの特徴として、並列送信数が増加すると各受信アンテナの信号点が激しく変動する。そこで、信号点遷移規範という、平均値からの遷移を定量化し、並列送信数識別に適用した。無線システムをモデル化したシミュレーションを構築し、信号識別の精度および、所要精度を達成するために必要な条件を導出する。

- (2) 機械学習を用いた並列本数識別法

(1)の信号点遷移規範による識別法では、平均SNRに基づき適切な閾値設計が必要になる。これまでの検討では、識別を実施するための事前評価（検定統計量）は、十分に確保できることを想定していた。しかし、実環境においては、検定統計量は少なく制限され、短時間で判定しなければ、送信機会が失われてしまう。そこで、検定統計量が少なく制限された場合に、適切な判定閾値を設計する手法と



(a) 実験装置



(b) 並列本数識別評価実験のブロック図

図1 並列本数識別の実験系

して、機械学習による多次元識別（サポートベクターマシン：SVM）に注目した。そこで、多次元識別を並列本数識別に適用し、検出精度及び必要な検出サンプル数について評価した。

- (3) MIMO 送信アンテナ本数推定におけるFPGA実機検証の基礎検討

MIMO環境を想定した同時並列送信数の特定実験を、FPGAにより実機検証した。FPGAは、Field Programmable Gate Arrayの略で、書き換え可能な信号処理ボードである。本稿では、FPGAを用いて、アナログの変調信号を離散時間信号に変換した際の、品質劣化の評価および、離散時間信号に要する処理時間を定量的に評価した。図1に構成する実験機構を示す。任意信号発生器（NF社製WF1974）より、1並列送信および2並列送信時に1アンテナで受信したときに現れる信号を、電圧波形として出力する。本信号発生器は同一の信号を2チャンネル同時出力可能である。そこで、1番目のチャンネルの出力をFPGA入力に接続し、2番目のチャンネル出力は、直接デジタルオシロスコープ（テクトロニクス社製DPO2024）に入力し、参照信号とした。FPGAでは、アナログ連続波形を、離散時間量子化デジタル信号波形に変換する。そして、デジタル波形からアナログ波形に再び復元した。これによって、AD変換によって生じた量子化誤差に起因する検出波形歪を、アナログ電圧波形に含めて出力することができる。出力信号波形と信号発生器より直接入力された波形を同時検出し、比較することで、FPGAによる信号処理において発生する歪量を評価する。加えて、2チャネ

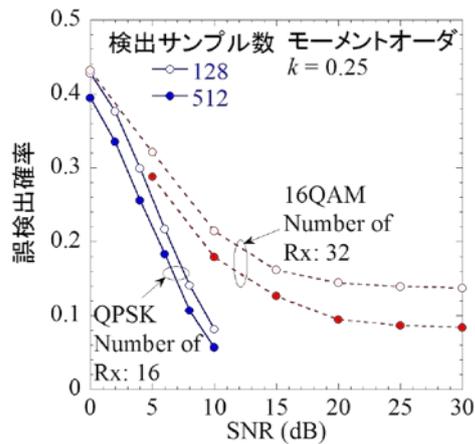


図2 SNRに対する誤検出確率(信号点遷移量規範)

ル同時出力機構を活用し、処理遅延時間を評価する。

(4) MIMO 空間共有による SS の加入によるスループット改善量評価

MIMO・コグニティブ無線環境において、PS の並列伝送数を特定したとき、新たに SS が伝送できる並列数を確定し、伝送することで、最終目的である周波数利用効率が改善される。よって、PS の並列伝送数が特定できた際、SS がさらに伝送できる伝送容量や PS の伝送容量の低下を定量的に明らかにすることが必要になる。そこで、計算機シミュレーションにより、MIMO・コグニティブ無線システム環境を模擬し、PS および SS が達成できる伝送容量を評価した。さらに、PS の許容伝送容量低下が平均値で与えられたときに、SS が並列伝送を決定するための様々な基準を設計し、PS の伝送容量が保証される適切な基準が存在することを指摘する。

4. 研究成果

(1) 信号点遷移量規範による並列本数識別法

図2に、受信信号電力対雑音電力比 (SNR) に対する誤検出確率を示す。SNR は、受信電力を示す基準量であり、SNR が低いほど、検出対象の信号電力が低くなる。今回は、PS が並列送信数を1あるいは2のいずれかを選択的に送信しており、PS がどちらを選択したか SS が推定する。ここで、誤検出確率とは、PS が1並列のとき SS が2並列と推定した場合、あるいは反対に PS が2並列のとき SS が1並列と推定した場合を誤検出と定義し、その発生確率を示す。また、変調方式として QPSK と 16QAM を用いており、高速大容量通信では、16QAM が積極的に用いられている。検出サンプル数は128と512とし、後者の方が検出時間が長い場合に相当する。図より、QPSK 変調においては、誤検出確率10%を達成するために必要な SNR は 8dB~10dB である。一方、16QAM では、検出サンプル数が128のとき、誤検出確率10%を達成できない。一方、検出サンプル数を512

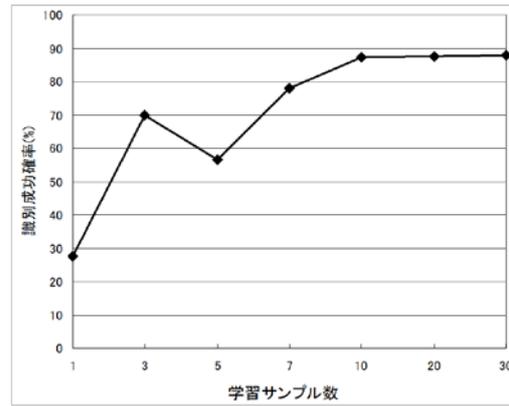


図3 サポートベクターマシン(SVM)使用時の並列本数識別に必要な学習サンプル数

に拡大することで、SNR が 20dB のとき、誤検出確率 10%を達成している。よって、16QAM 変調を用いている場合には、検出サンプル数の拡大と、高い所要 SNR が必要になることが確認された。

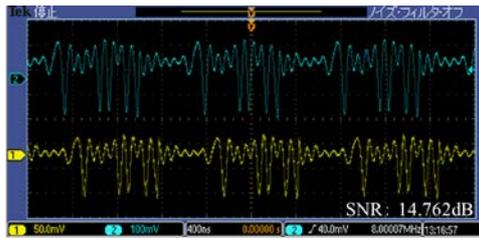
(2) 機械学習を用いた並列本数識別法

図3に学習サンプル数に対する識別成功率の特性を示す。ここで、SNR は 10(dB)、PS が取りうる並列送信数は1、2、4の3つのいずれかを選択的に用いている。多次元識別における、識別のための次元数は 16×16 次元とした。本特性の識別成功率は、PS が並列送信数1を選択したときに、その推定に成功する確率を示している。また、並列送信数が2、4についても成功率の絶対値は異なるが、同様の外形となるため、議論の対象からは外した。図より、学習サンプル数が10を超えてから、成功率の改善はほとんど認められない。本稿で想定した環境では、10サンプル程度の学習で、十分収束した識別のための多次元分離超平面を形成できることがわかる。また、学習サンプル数3において、5の時の場合に比べ高い成功率となっている。この結果から、分離超平面の形成に有効なサンプルは必ずしも連続的に与えられず、取捨選択が必要になることがわかる。

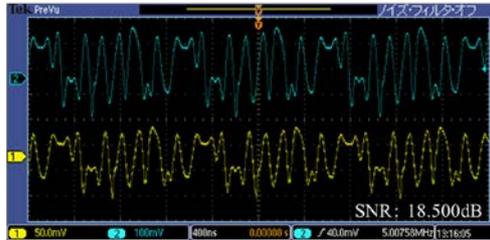
また、並列送信数が増えた場合には、多次元検出における次元数を増やすことにより、高い識別精度が実現できることを確認している。

(3) MIMO 送信アンテナ本数推定における FPGA 実機検証の基礎検討

図4に1アンテナ送信と2アンテナ送信時における、FPGA 通過後の信号波形と参照信号を示す。図より、FPGA 通過時においても、信号が忠実に再現できていることがわかる。信号電力対誤差電力比 (SNR) を評価したところ、14.7dB 以上確保することができている。(1)における、信号点遷移量規範による信号点識別法では、QPSK 変調において、10dB 程度、16QAM 変調において、20dB 程度の SNR が必要になる。よって、本システ

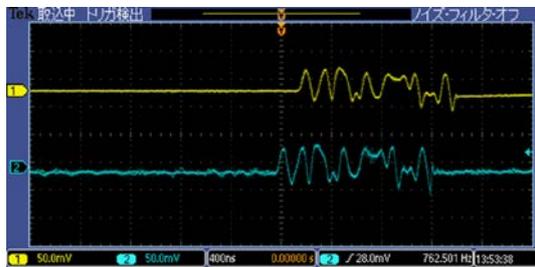


(a) 並列数:1



(b) 並列数:2

図4 FPGA信号検出による信号波形忠実度評価



通過特性評価(青(下段):参照信号,
黄(上段):FPGA出力信号),時間差183nsec

図5 FPGA処理遅延評価

ムであれば、QPSK 変調では、並列本数識別が可能であるが、16QAM 変調のときには、さらに SNR の確保が必要になる。しかし、検出サンプル数を拡大することで、必要 SNR を下げることができるため、16QAM 変調を適用した際には、検出遅延を許容し、検出時間を拡大することで、高精度な検出が可能であると考えられる。

図5に、信号発生器から出力された同一・同タイミング信号の受信波形を示す。図より、直接オシロスコープに入力した信号に比べて、FPGA を経由した信号が、約 183nsec の遅延が認められた。この処理遅延は、例として無線 LAN の最小時間単位である、ランダムバックオフ時間の最小単位の $9\mu\text{sec}$ に比べて圧倒的に小さいため、処理遅延はほぼ影響がないと考えられる。

(4) MIMO 空間共有による SS の加入によるスループット改善量評価

評価結果を図6に示す。図では、各種選択手法が示されている。詳しい分類は「5. 主な発表論文、[学会発表] ④と⑦」に譲り、いずれの場合も PS の伝送レートの劣化に対して、PS と SS の総伝送容量は凸傾向にあり、最大伝送容量が存在することが明らかになった。また、PS がより優先権が高い場合に

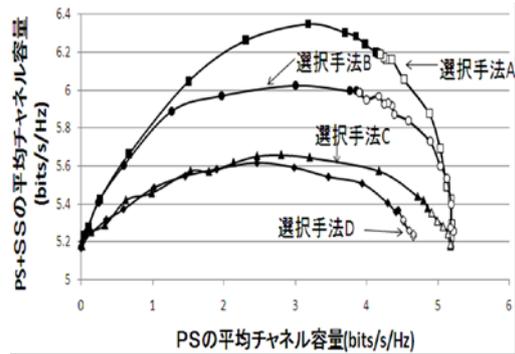


図6 PSの平均チャンネル容量に対する総チャンネル容量特性

において、SS の達成できる容量も特定することができるため、SS の必要伝送容量に合わせて空間共有の可否を決定することができる。

(6) 本研究課題のまとめ

本研究課題では、MIMO コグニティブ無線環境において、プライマリシステムとセカンダリシステムが空間共有して通信を確立する際に必要となる、PS のアンテナ並列伝送数推定法について検討を進めた。

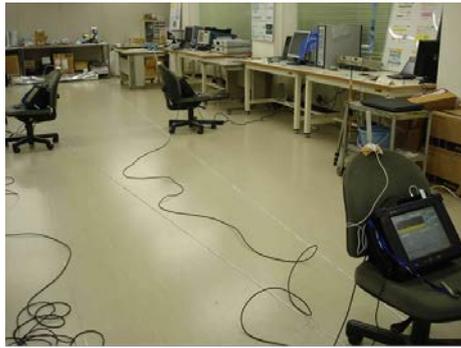
まず、簡易な方法である信号点遷移量による識別法、機械学習を用いた手法を提案し、その有効性を検証した。また、FPGA を用いた実機評価では、検出信号波形の忠実度を評価することで、検出に必要な検出品質を達成できるかを実機により評価した。評価の結果、低伝送時に用いられる単純な変調方式では、信号点遷移量により識別が可能である。一方、高速伝送時の複雑な変調方式では、検出に必要な時間数の拡大が必要不可欠であることがわかった。また、MIMO 空間共有を前提としたとき、2つのシステム間の共有により達成できる伝送容量を評価し、最大伝送容量の存在を明らかにした。さらに、PS の許容伝送容量が与えられた条件で、SS が最大容量を達成するように並列伝送数を決定する規範を提案し、PS と SS の同時伝送による伝送容量改善を達成した。

以上の成果に基づき、MIMO コグニティブ無線環境において、並列本数推定の有効性を示すことができた。しかし、高速大容量伝送に向けた高次変調方式を用いた場合における識別が困難であるため、これらを克服する新たな手法が必要であり、今後も引き続き検討を続ける必要がある。

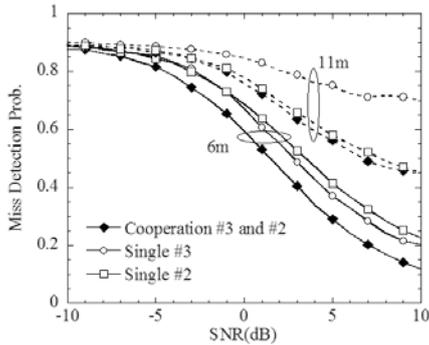
(7) 関連研究の成果

①多地点信号検出システムの構築および実験的検討

プライマリシステムのアクセスを検出するキャリアセンシング技術について、近年、多地点において同時検出することで、検出精度の高精度化および安定化が図れることが注目されている。これを、協調センシングという。この協調センシングのセンシング能力



(a) 協調センシング実験



(b) 誤検出確率特性 (Cooperation (協調) することで、誤検出確率を低く抑えられる。)

図7 協調センシングの実験検討

を評価する、実験的検討を進めた。実験環境の様子を図7に示す。本実験では、信号を多地点で同時検出し、その結果を計算機上に再現することで、様々な信号解析法の適用、無線環境を模擬した様々な環境における評価を実施した。評価結果より、協調センシングの適用を確認した。本成果は、国際会議 Crowncom における技術展示において発表し、世界的にその技術や評価機構を周知した。②無線 LAN の高精度検出を実現する周期定常性検出の実験的検討

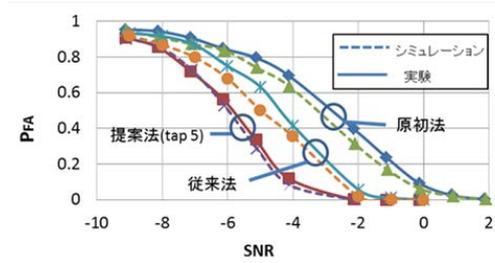
無線 LAN における無線アクセスの検出 (キャリアセンシング) において、周期定常性検出法による高精度検出法が検討されている。課題として、同期用パイロット信号が高い周期定常性特性を有しているが、干渉回避用の周期的拡張 (Cyclic Prefex) が定常性を劣化させていることが指摘されている。本課題では、周期定常性劣化を補償する検出方法を提案すると同時に、実験的にその検出精度を実証した。実験環境および測定結果を図8に示す。図より、提案法の有効性を確認できる。

③電力増幅器の高効率化の実験

本研究課題は、実機による実験的検討であり、実機検証のノウハウを生かし、電力増幅器の実験検証を行った。実験では、電力増幅器の消費電力が、入力信号の包絡線変動に依存することを検証した。実験機構および評価結果を図9に示す。図では、包絡線変動を低く抑えるクリッピングアンドフィルタリング

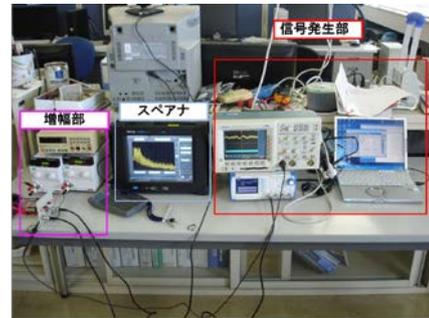


(a) 実験系

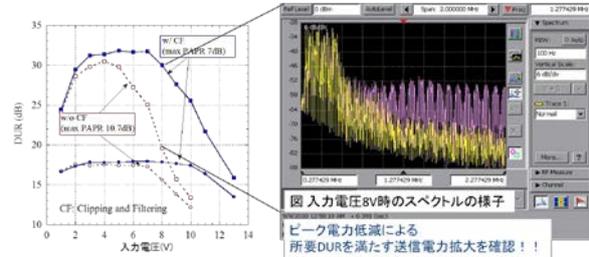


(b) 測定結果 (提案法が低いSNRで低い誤警報確率を達成)

図8 周期定常性検出実験



(a) 評価実験系



(b) 測定結果

図9 電力増幅器の電力効率評価実験

(CF) を適用した結果を示す。図より、信号入力電力が拡大したとしても、CF を適用することで、所要帯域以外へのスペクトル放射が低く抑えられるため、CF により、より高い電力を引き出すことが可能であり、電力効率の改善が確認できる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 11 件)

- ① 長谷川 博哉、田久 修、榎田洋太郎、〃 OFDM 変調信号に対する周期定常性検

- 出の実験的検討、” 電子情報通信学会 東京支部学生講演会 (東京都品川区) 188、2012年3月3日
- ② Osamu.Takyu、 Yohtaro Umeda、 “Optimal Subcarrier Assignment for Single Cell Multiuser OFDM System、” IEEE RWS2012、 pp. 335-338、 January 18, 2012
- ③ Osamu.Takyu、 Hiroyoshi Yano、 Takeo Fujii and Tomoaki Ohtsuki、 “Double Stage and Combining Detection for Cyclo-stationary Feature、” IEEE RWS2012、 pp. 371—374、 January 18, 2012
- ④ 小金井朗王、田久 修、 榎田洋太郎、 “コグニティブ MIMO 無線システムにおける、プライマリシステムの最低伝送レート保証をしつつスペクトラムシェアリングを行うアンテナ選択手法、” 電子情報通信学会、ソフトウェア無線研究会 (SR) SR2011-47、 pp. 23-28、 2011年10月26日
- ⑤ Hiroyoshi Yano、 Osamu TAKYU、 Takeo Fujii and Tomoaki Ohtsuki、 “Low Complexity Cyclostationary Feature Detection Method to Compensate Cyclostationarity-Degradation by Guard Interval Insertion” Crowncom 2011、 pp. 51—55、 June 1, 2011
- ⑥ Osamu TAKYU、 Shunta Horie、 Masahiro Furuichi、 Takamasa Kimura、 Takeo Fujii and Yohtaro Umeda、 “Measurement method and result for Frequency Spectrum Sharing in Cognitive Radio” Demonstration Session of Crowncom2011、 June 1, 2011
- ⑦ 小金井 朗王、田久 修、 関 洋亮、 榎田 洋太郎、 “コグニティブ MIMO 無線システムにおける、プライマリシステムの伝送速度を保証する送信方法選択法の検討” 電子情報通信学会 総合大会 2011年3月15日
- ⑧ Osamu TAKYU、 Yohtaro UMEDA、 “Subcarrier Assignment for Achieving Tradeoff between Peak Power and Channel Capacity in Block Transmission of Multiuser OFDM、” IEEE International Conference on Communication System (ICCS)、 pp 431—435、 November 19, 2010
- ⑨ 古市雅洋、田久 修、 榎田洋太郎、 藤井威生、 中川正雄、 “MIMO コグニティブ無線通信における並列送信数識別の特徴量に関する考察、” 電子情報通信学会 ソサイエティ大会、 B-17-2、 pp.516、 2009

年9月18日

- ⑩ 古市雅洋、田久 修、 榎田洋太郎、 藤井威生、 中川正雄、 “MIMO コグニティブ無線通信におけるパターン認識による並列送信数識別に関する考察、” 電子情報通信学会、ソフトウェア無線研究会 (SR) SR2009-11、 pp.69-74、 2009年5月29日
- ⑪ Osamu TAKYU、 Takeo FUJII、 Yohtaro UMEDA、 and Masao NAKAGAWA、 “Detection Method for Recognizing Number of Parallel Transmitted Symbols in MIMO-Cognitive Wireless Communication” IEEE ISITA 2008、 December 10, 2008

[その他]
ホームページ等
<http://soar-rd.shinshu-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田久 修 (TAKYU OSAMU)
信州大学・工学部・助教
研究者番号：40453815