

平成 21 年 6 月 10 日現在

研究種目：基盤研究（C）	
研究期間：2007～2008	
課題番号：19560377	
研究課題名（和文）	超高信頼性多層型 MIMO-OFDM 伝送のための適応アレービームフォーミング技術
研究課題名（英文）	Adaptive Array Beamforming Techniques for Multi-Layer MIMO-OFDM Transmission with Super-High Reliability
研究代表者	
菊間 信良 (KIKUMA NOBUYOSHI)	
名古屋工業大学・工学研究科・教授	
研究者番号：40195219	

研究成果の概要：周波数領域 MIMO (Multiple Input/Multiple Output) である OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 伝送方式に空間領域 MIMO を導入した無線通信システムにおいて、送受アレーアンテナのビームフォーミングを適応的かつ効率的に行う種々の技術について研究開発を行った。計算機シミュレーションおよび電波暗室内実験を通して、ビームフォーミングのための適応アルゴリズムの開発・改良、アレーアンテナの校正技術などにおいて重要な成果を得ることができた。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	3,200,000	960,000	4,160,000
2008年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

研究分野：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：アレーアンテナ, 適応信号処理, MIMO 構成, OFDM 伝送, 到来方向推定, EM・SAGE アルゴリズム, 校正アルゴリズム, 多層構造

## 1. 研究開始当初の背景

近年の情報の高速伝送ニーズの高まりを受け、100Mbps～1Gbps を超える大容量無線伝送を目指した無線通信システムの研究が盛んに行われている。その中で、5GHz 帯を利用する高速無線アクセスシステムの変復調方式として、周波数利用効率の高い直交周波数分割多重 (OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 方式が採用されている。OFDM 方式は、広帯域化・耐無線伝搬特性

において優れた特性を有することから、将来の無線通信・放送技術を統合化する技術としても有力視されている。OFDM 方式は直交する複数のサブキャリア、すなわちマルチキャリアに情報を載せて伝送する方式であり、周波数領域での MIMO (Multiple Input/Multiple Output) とみることができる。そのデータシンボルには多重波 (遅延波) によるシンボル間干渉を回避するためにガードインターバル (GI) が設けられており、GI 長よりも短い遅延

延時間の多重波であればパスダイバシティの効果が得られる。

しかし、ガードインターバル(GI)を超える遅延時間を有する多重波が到来すれば、干渉による周波数選択性フェージングが発生し、通信品質が大きく劣化する。また、多重波の遅延時間が GI 長以内であっても、直接波と遅延波の干渉により周波数領域でノッチが観測され、特定のサブキャリアの CNR(搬送波対雑音電力比)は劣化し、伝送効率が低下する。従って、伝送効率を維持するには無線通信システムやアンテナ技術で多重波の影響を抑圧または回避する必要があり、アダプティブアレー等の適応信号処理技術に対する期待が高まっている。

## 2. 研究の目的

本研究は、周波数領域 MIMO である OFDM 伝送方式に空間領域 MIMO を導入した二次元 MIMO 無線通信システムにおいて、送受アレーアンテナの周波数特性も含めたビームフォーミングを適応的かつ効率的に行う技術について研究開発するものである。通常、アダプティブアンテナ、あるいはスマートアンテナと呼ばれる信号処理アレーアンテナを用いることとなるが、本研究では、送受信それぞれにおいて単体で適応能力をもつスマートアンテナ等を複数配置し、これらをアレー素子として用いる多層型 MIMO を基本的構成と考えている。素子としてエスパアンテナなどの非 DBF (Digital Beam Forming) アンテナを用いれば、アナログとデジタルのハイブリッド方式となり、小型化、低コスト化につながる。さらにアダプティブアンテナ素子の指向性のみならず、偏波特性も制御できるようにしてアンテナがもつ空間の自由度を最大限に利用する方向に改良していく。

(1) MIMO-OFDM 伝送において多次元アレーの性質を利用して、周波数選択性フェージングの克服と干渉の除去を行う適応アルゴリズムを提案し、特性解析する。アダプティブアレーは本来受信システムであるが、送信する際にも最適な指向合成ができるようなアルゴリズムを工夫する。これは主に基地局用である。一方、移動局用には、2 素子程度のアレーアンテナで検討を試みる。特に素子配置上、素子間の相互結合が大きく影響を及ぼすので興味深い検討課題である。さらに、MIMO 構成により送受で適応信号処理を行うことができるので、処理の自由度が増加し、改善効果も大きく期待できる。

(2) 従来のアダプティブアレーは、各アンテナ素子の重み付けを変化させてアレーファクタのみを制御してきた。本研究では、アン

テナ素子個々の指向性及び偏波特性も可変で制御可能としたシステム構成をとり、アンテナ素子を含めたトータルシステムの最適化のための効率的な適応アルゴリズムを開発する。

(3) 適応アルゴリズムには MIMO-OFDM 伝送に適した MMSE (Minimum Mean Square Error)、CMA (Constant Modulus Algorithm) や SCORE (Spectral self-COherence REstoral) を中心に用い、改良・改善を行う。また MUSIC、ESPRIT、MODE 等の高分解能方向推定アルゴリズムを用いた指向性合成法についてもその有用性を検討する。

(4) 計算機シミュレーション及び電波暗室内の実験を通して、提案システムを用いることの有効性を示す。同時に、システムの信頼性を定量的に評価する方法についても検討する。具体的には、様々な通信環境において提案システムの制御特性を詳細に調べ、スペクトラム、符号誤り率等を用いて統計的かつ総合的な特性評価を行い、提案システムの信頼性の高さを実証する。

## 3. 研究の方法

(1) 1 ~ 5 GHz 帯モノポールアンテナから成る 2 ~ 8 素子アレーアンテナを製作する。また、アンテナ出力をデジタル化し、処理するために、A/D 変換できる周波数帯までダウンコンバートする周波数変換器が必要である。これを製作し、回路出力の周波数特性を詳細に測定する。

(2) アダプティブアレーまたはスマートアンテナを動作させる制御方式は全てデジタル化して行う DBF (Digital Beam Forming) 方式が基本である。一方、ESPAR (Electrically Steerable Passive Array Radiator) アンテナ方式も近年、注目を浴びており、特に携帯端末用アダプティブアレーとして有用性が示されている。本研究では、移動通信に適したアルゴリズム規範として MMSE (Minimum Mean Square Error)、CMA (Constant Modulus Algorithm)、等を取り上げ、ESPAR アンテナ等の小型アダプティブアンテナをアレー素子とするアダプティブアレー構成 (adaptive array of adaptive arrays) を考え、アレーファクタのみならず各アンテナ素子の指向性や偏波特性も制御するアルゴリズムについて検討を行う。そして多層型 MIMO-OFDM 構成用へと発展させていく。

(3) パーソナルコンピュータ上で各種デジタル変調信号を発生させ、実際の多層型

MIMO-OFDM 通信の電波環境（送信信号及びその遅延多重波と干渉波）を作る．簡単な電波伝搬モデルからかなり実際的なモデルまで複数作成し，多角的評価ができるようにする．これらのモデルを用いてアンテナの指向性及び偏波特性，符号誤り率などの諸特性を調べ，制御アルゴリズムとシステム全体の評価を行う．なお，基地局用，移動局用のそれぞれの観点から，重み付け方式の比較検討をしつつ，必要に応じて制御アルゴリズムの改良を行っていく．

(4) パーソナルコンピュータ上での計算機シミュレーションと電波暗室内実験を通して多層型 MIMO-OFDM 方式移動通信制御アルゴリズムの評価を行う．具体的には，まず計算機シミュレーションによる解析を行い，ある程度特性が明確になった後，デジタル変調信号発生器及びデジタルオシロスコープにより実際にデジタル信号を送受信し，フェージング・干渉の影響を調べる．さらに，可変素子指向性の効果を明らかにしつつ，同時に制御アルゴリズムに改良を加えて行く．システムの信頼性を定量的に評価する方法についても平行して検討する．

#### 4. 研究成果

(1) 2～5 GHz 帯モノポールアンテナから成る 2～8 素子リニアアレーアンテナを製作し，指向特性，周波数特性など良好なアンテナ特性を確認した．

(2) アンテナ出力（受信信号）をデジタル化し，処理するために，A/D 変換できる周波数帯までダウンコンバートする周波数変換器を製作した．ダウンコンバートするためのローカル信号用に信号発生器（ローデシュワルツ・SMA-B106）を用いた．これと A/D 変換器およびコンピュータとで受信機を構成し，アンテナを含めた受信機の良好な入出力特性を確認した．

(3) OFDM 伝送用のアダプティブアルゴリズムについて検討を行った．その結果，従来のアルゴリズムの収束特性を改善するアルゴリズムの開発に成功した．また，多重波の到来方向推定を行うために，EM (Expectation-Maximization) および SAGE (Space Alternating Generalized EM) アルゴリズムを利用することを検討した．いくつかの改良アルゴリズムを提案し，それらの特性比較を行った結果，良好に推定を行うための重要な知見を得ることが出来た．さらにアレーアンテナの校正も同時に実行する SAGE アルゴリズムを提案し，その有効性を実証した．

(4) OFDM 伝送用のアダプティブアルゴリズムについて改善を行った．使用したアルゴリズムは研究室で開発したブラインド MSE (Minimum Mean Square Error) で，計算機シミュレーションを通して，アルゴリズムの収束特性を改善することに成功した．また，MIMO を導入した多層構造のアダプティブシステムにも十分適用可能であることを確認した．

(5) 電波暗室内での電波到来方向推定の実験を行った．実験用アレーアンテナは上記の 2～5 GHz 帯モノポールアンテナから成る 2～8 素子リニアアレーアンテナで，校正機能付き SAGE アルゴリズムなど，提案手法が十分な推定精度と分解能をもつことを確認できた．

#### 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)

[雑誌論文] (計 10 件)

① □ 榎野祐一，榊原久二男，林佑樹，菊間信良，平山裕，“ミリ波マイクロストリップコムラインアンテナアレーの給電線路垂直面ビームチルト設計”，電子情報通信学会論文誌 B, vol. J90-B, no. 9, pp. 864-872, Sept. 2007, 査読有

② □ Hideo Iizuka, Kunio Sakakibara, Nobuyoshi Kikuma, “Millimeter-wave transition from waveguide to two microstrip lines using rectangular patch element”, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 55, no. 5, pp. 895-905, May 2007, 査読有

③ □ Hideo Iizuka, Toshiaki Watanabe, Kunio Sakakibara, Nobuyoshi Kikuma, “Stub- and Capacitor-Loaded Folded Dipole Antenna for Digital Terrestrial TV Reception”, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 56, no. 1, pp. 215-222, Jan. 2008, 査読有

④ □ 石黒靖博，菊間信良，平山裕，榊原久二男，“SAGE アルゴリズムを用いた DOA 推定のためのアレーアンテナ校正法”，電子情報通信学会技術研究報告，vol. 107, pp. 89-94, March 2008, 査読無

⑤ □ Shinya Sugiura, Nobuyoshi Kikuma, Hideo Iizuka, “Eigenspace-Based Blind Pattern Optimisations of

Steerable Antenna Array for Interference Cancellation”, IET Microwaves, Antennas & Propagation, vol.2, pp.358-366, June 2008, 査読有

- ⑥ 田端隆伸, 菊間信良, 堀智, 安里博一, 和田和久, “車載用地上デジタル放送受信のためのアダプティブアレーアンテナシステムの実験的研究”, 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 108, pp. 195-200, July 2008, 査読無
- ⑦ 廣野真人, 今井啓太, 榊原久二男, 菊間信良, 平山裕, “多層基板で構成された広帯域マイクロストリップ線路・導波管変換器のミリ波帯試作特性”, 電子情報通信学会論文誌 B, vol. J91-B, no. 9, pp. 1057-1065, Sept. 2008, 査読有
- ⑧ 古賀健一, 菊間信良, 平山裕, 榊原久二男, 河村大輔, 岩下明暁, 水野善之, “コヒーレント信号部分空間法を用いた近傍波源位置推定に関する検討”, 電子情報通信学会技術研究報告, vol.108, pp. 133-138, Nov. 2008, 査読無
- ⑨ Kazuoki Matsugatani, Kunio Sakakibara, Nobuyoshi Kikuma, Hiroshi Hirayama, “Broadband Planar Antenna Combining Monopole Element with Electromagnetic Bandgap”, IEICE Transactions on Electronics, vol.E91-C, no.11, pp.1778-1785, Nov. 2008, 査読有
- ⑩ Takaoki Ikeda, Kunio Sakakibara, Toru Matsui, Nobuyoshi Kikuma, Hiroshi Hirayama, “Beam-Scanning Performance of Leaky-Wave Slot-Array Antenna on Variable Stub-Loaded Left-Handed Waveguide”, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol.56, no.12, pp.3611-3618, Dec. 2008, 査読有

[学会発表] (計6件)

- ① Takanobu Tabata, “Experimental Study of Adaptive Array Antenna System for ISDB-T High Speed Mobile Reception”, 2007 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, 2007年6月10日, Honolulu, USA
- ② Yasuhiro Ishiguro, “Improvement of Array Calibration Method for DOA Estimation by Using Weighted Reference Signals”, International Symposium on

Antennas and Propagation (ISAP) 2007, 2007年8月22日, 新潟市

- ③ Nobuyoshi Kikuma, “An OFDM Blind Adaptive Array Using Guard Interval with Eigen-Beamspace Preprocessor”, International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP) 2007, 2007年8月23日, 新潟市
- ④ Yuichi Inami, “Study on Improvement of Convergence Characteristics of the Blind MMSE Adaptive Array in OFDM Transmission System”, International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP) 2008, 2008年10月28日, Taipei, Taiwan
- ⑤ Yasuhiro Ishiguro, “Calibration Method of Array Antenna for DOA Estimation Using SAGE Algorithm”, International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP) 2008, 2008年10月29日, Taipei, Taiwan
- ⑥ Masaru Ogawa, “Derivative Constrained Capon Estimator Using Integrated Mode Vector”, 2008 European Radar Conference (EuRAD 2008), 2008年10月31日, Amsterdam, Netherlands

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

菊間 信良 (KIKUMA NOBUYOSHI)  
名古屋工業大学・工学研究科・教授  
研究者番号: 40195219

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし