

マルチアンテナ無線伝送技術

その4 アダプティブアンテナアレービーム送受信技術

伝送ビットレートの飛躍的増大，あるいは高品質受信を可能とする主要技術の1つとして，マルチアンテナ技術が近年注目されている。最終回となる今回は，指向性送受信によりセルラ環境におけるカバレッジ拡大やリンク容量増大に有効なアダプティブアンテナアレービーム送受信法，およびPre-codingを用いたMIMO伝送法について解説する。

ひぐち けんいち たおか ひでかず
樋口 健一 田岡 秀和

1. まえがき

アダプティブアンテナアレービーム（AAA-BF：Adaptive Antenna Array-Beam Forming）送受信法[1][2]は，複数の送受信アンテナを互いに近接して配置し（半波長程度），指向性ビームで送受信するマルチアンテナ送受信技術である。前回までに紹介したMIMO（Multiple Input Multiple Output）多重法^{*1}が，主にピークのデータレートを向上する技術であるのに対し，AAA-BF送受信法は，指向性ビーム送受信により受信信号電力を増大することにより，セルラ環境におけるカバレッジエリア^{*2}の増大に有効な技術と位置付けられる。さらにAAA-BF送受信法では，互いに位置の離れた複数のユーザに対して，ユーザごとに異なる指向性ビームで同時に送受信することによる空間分割多重アクセス（SDMA：Space Division Multiple Access）^{*3}を実現でき，これによりリンク容量の増大を実現することができる。また，近年MIMO伝送法において同様の指向性送信を実現するPre-coding法が注目されている[3]～[5]。本稿では，指向性送受信によるセルラ環境におけるカバレッジエリアの拡大およびリンク容量増大に有効なAAA-BF送受信法，およびPre-codingを用いるMIMO伝送法について解説する。

2. AAA-BF送信法とPre-codingを用いるMIMO伝送法

本章では，AAA-BF送信法とPre-codingを用いるMIMO伝送法の基本的構成と両者の違いについて述べる。

2.1 AAA-BF送信法

基地局にAAA-BF送受信機能がある場合の基本構成を図1に示す。AAA-BF送受信法では，複数の送受信アンテナの間隔は一般に搬送波周波数の半波長程度と小さくする。これにより，各アンテナにおける受信/送信信号は，ほぼ同じフェージング変動を受けることになる。しかし図2に示すように，各アンテナでの受信/送信信号は，移動局の位置つまり基地局からの角度方向（DOA：Direction Of Arrival）と複数アンテナの配置に依存した経路差^{*4}が生じる。AAA-BF送受信法では，このアンテナごとの受信信号の経路差に起因した位相差を利用する。すなわち，AAA-BF受信法では，受信したい移動局のDOA θ に相当する位相差だけ各受信アンテナの受信信号を逆方向に位相回転してから合成することにより，希望受信信号が同相加算されるため，受信信号電力を増大できる。同様に，AAA-BF送信法では，送信したい移動局のDOA θ に相当する位相差だけ各送信アンテナの送信信号をあらかじめ逆方向に位相回転して送信することにより，移動局において複数の送信アンテナからの送信信号が同相で合成されて受信されるため，受信信号電力を送信アンテナ数倍に増大することができる。このように，各アンテナに乗算する係数（位相回転量）をアンテナウェイト^{*5}と呼ぶ。また，同じ原理により複数移動局が同時に信号伝送を行う場合，干渉となる移動局の信号が逆相で加算されて打ち消しあうようにアンテナウェイトを生成することにより，干渉が抑圧され，同じ周波数，時間，拡散符号を用いた複数ユーザを同時に収容するSDMAが実現できる。図1はSDMAを行わない1ユーザ送受信を例示している。一般には，平均2乗誤差最小

*1 MIMO多重法：複数の送受信アンテナを用いて信号伝送を行うMIMO伝送法のうち，送信アンテナごとに異なる信号を空間的に多重して送信することにより，伝送レートをアンテナ数倍に向上する方法。

*2 カバレッジエリア：1基地局当りの移動局端末との通信を行うことができるエリア（セル半径）。カバレッジが大きいほど設置する基地局数を減減できる。

*3 空間分割多重アクセス：同一セルの複数のユーザに対し，互いに異なる狭いビーム幅の指向性ビームを用いて送受信することにより，各ユーザの信号を空間的に分離し，周波数利用効率を高めること。

*4 経路差：上りリンクにおいて，移動局からの送信信号が，各アレーアンテナに到達するまでの伝搬距離差。下りリンクにおいてはその逆を指す。

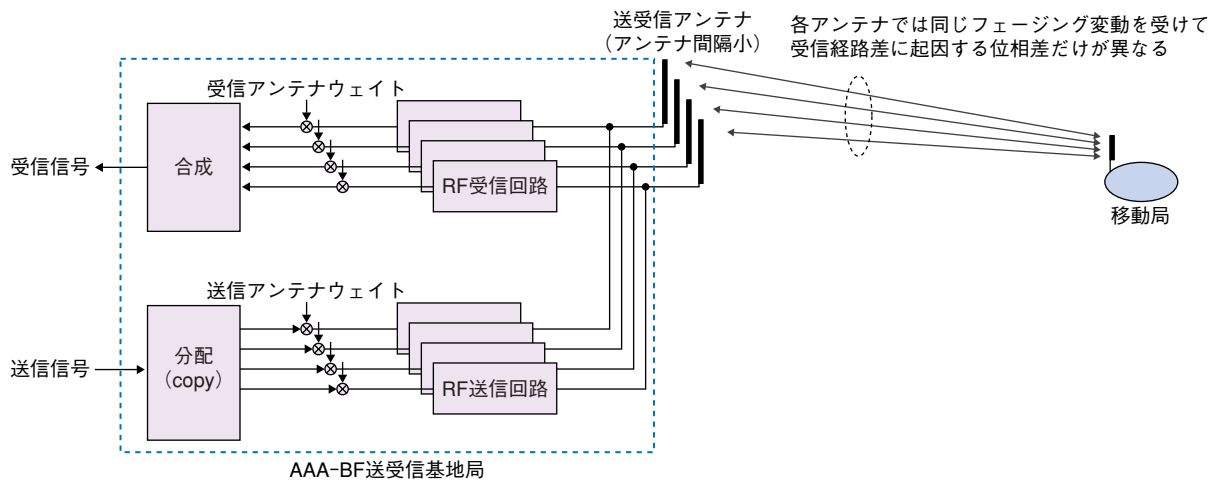


図1 AAA-BF送受信法の基本構成 (SDMAを行わない場合)

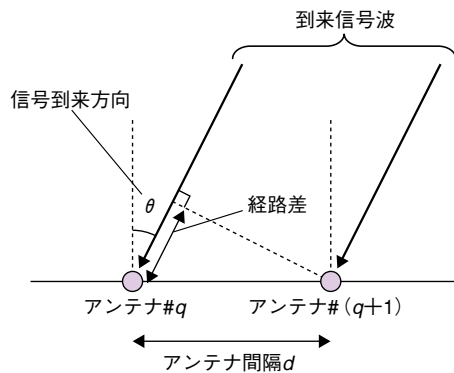
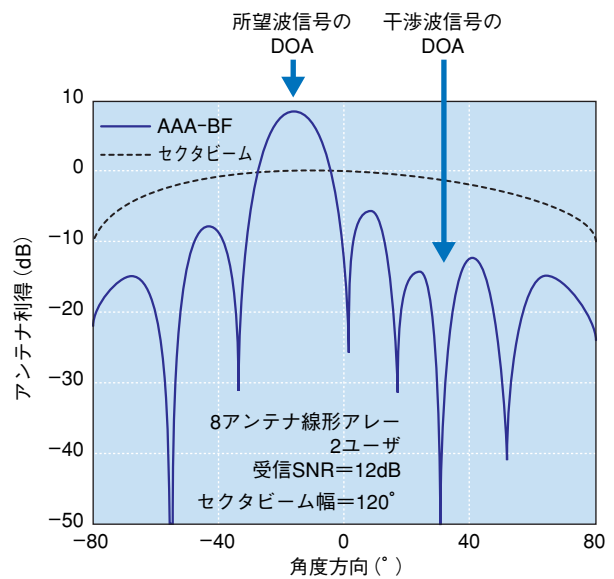


図2 信号到来方向とアンテナ間の位相差の関係

(MMSE: Minimum Mean Square Error)^{*6} 規範のアンテナウェイトを用いることで受信 SINR (Signal to Interference plus Noise power Ratio)^{*7} を最大にすることができる[6][7]. MMSE制御によるAAA-BF送信法のビームパターン例を図3に示す. 所望波信号のDOAに高いアンテナ利得が得られる一方, 干渉波信号のDOAにはビームヌル^{*8}が形成され, アンテナ利得が非常に低くなっている. また, セルラシステムでは, 一般に下りリンクのセルサーチおよび共通制御チャネルなどのためにセクタビーム送信の共通パイロットチャネルが送信されるが, AAA-BF送信法ではデータチャネルは共通パイロットチャネルと異なる指向性ビームで送信される. したがって, 受信側での同期検波のため同じビームで送信される個別パイロットチャネルを送信する必要がある. AAA-BF送受信法では, アンテナ間のフェージング変動がほぼ同じ (フェージングの相関が高い) であるた



SNR (Signal to Noise power Ratio) : 信号電力対雑音電力比

図3 MMSE制御によるAAA-BF送受信のビームパターン例

め, スペースダイバーシチ効果はほとんど得られない.

ここで, AAA-BF基地局は, 上りリンクAAA-BF受信法により, 各移動局のDOAをパイロットチャネルを用いて各受信アンテナにおける受信位相差から推定することができるため, 下りリンクのAAA-BF送信法を行う際に移動局からのフィードバック情報を必要としないという特徴がある. しかしながら, 実際の基地局では各アンテナのRF (Radio Frequency) 送信回路および受信回路がそれぞれ回路固有の独立な位相回転と振幅変動を有するため, 上りリ

*5 アンテナウェイト: AAA-BF送受信において, 各アンテナの受信信号もしくは送信信号に対して乗算する複素数の重み係数. 複素数の重み係数を乗算することにより, 各アンテナの振幅や位相成分を制御できる.
*6 平均2乗誤差最小: アンテナウェイトを算出する方法の1つ. 参照信号 (パイロットシンボル) とアンテナ合成後の受信信号の平均2乗誤差が最小となる規範で求められ, アンテナ合成後の受信 SINR (*7参照) を最

大にできる.
*7 受信 SINR: 所望波信号の受信信号電力と, それ以外の干渉波信号と雑音電力の和の比.
*8 ヌル: ビームパターンにおいて, アンテナ利得が極小となる方向.

リンクにおいてアンテナ端でのDOAを正しく推定し、また下りリンクのAAA-BF送信法において、アンテナ端での実際のDOAに指向性を与えるためには、あらかじめ各RF回路の位相回転と振幅変動を測定し補償するRF回路キャリブレーションが必須となる[8]。実際には、送受信のキャリア周波数差に起因するキャリア周波数キャリブレーション[9][10]も必要だが、ここでは説明を省略する。

2.2 Pre-codingを用いるMIMO伝送法

基地局にPre-codingを用いるMIMO伝送法の送信部の基本構成を図4に示す[3]。Pre-codingを用いるMIMO伝送法では、送信アンテナの間隔を大きくする。これにより、各送信アンテナから送信された信号は異なるフェージング変動を受ける。Pre-codingを用いるMIMO伝送法も、原理的にはAAA-BF送信法と同様、移動局で受信した際に各送信アンテナからの送信信号が同相で合成されるように、かつ他の送信信号も同時に送信される場合には他の送信信号に対する干渉が最小限になるよう、送信アンテナウェイトが生成される。

しかしながら、送信アンテナの間隔を大きくするMIMO伝送法では、AAA-BF送信法と異なり、各送信アンテナからの送信信号は互いに異なるフェージング変動を受けるた

め、移動局のDOAや平均受信信号電力に基づいたアンテナウェイトでは指向性送信利得が得られず、瞬時フェージング変動を考慮して受信側で各アンテナからの送信信号が同相合成されるようなアンテナウェイトが必要となる。したがって、上下リンクで異なるキャリア周波数を用いる周波数分割複信(FDD: Frequency Division Duplex)*⁹方式では、上下リンクの瞬時フェージングの相関がないため、送信アンテナウェイトを生成するために、移動局から下りリンクの送信アンテナごとの瞬時チャンネル変動を上りリンクを介してフィードバックする必要がある。送信アンテナごとの瞬時チャンネル変動を推定するためには、送信アンテナごとに他のアンテナと直交するパイロットチャンネルを送信する必要がある。実際には、瞬時チャンネル変動をそのまま上りリンクでフィードバックすると大きなオーバーヘッドとなるため、あらかじめPre-codingで用いる送信アンテナウェイトの候補(この候補をまとめたものはCodebookと呼ばれる)を移動局に通知しておき、移動局側で受信したパイロット信号を用いて推定した送信アンテナごとのチャンネル変動値に応じて、各送信アンテナウェイトを用いた場合の受信SINRを推定し、受信SINRが最大となる最適な送信アンテナウェイト番号を基地局に通知する方法が検討されている(図5)[5][11]~[13]。一方、このフィードバックで

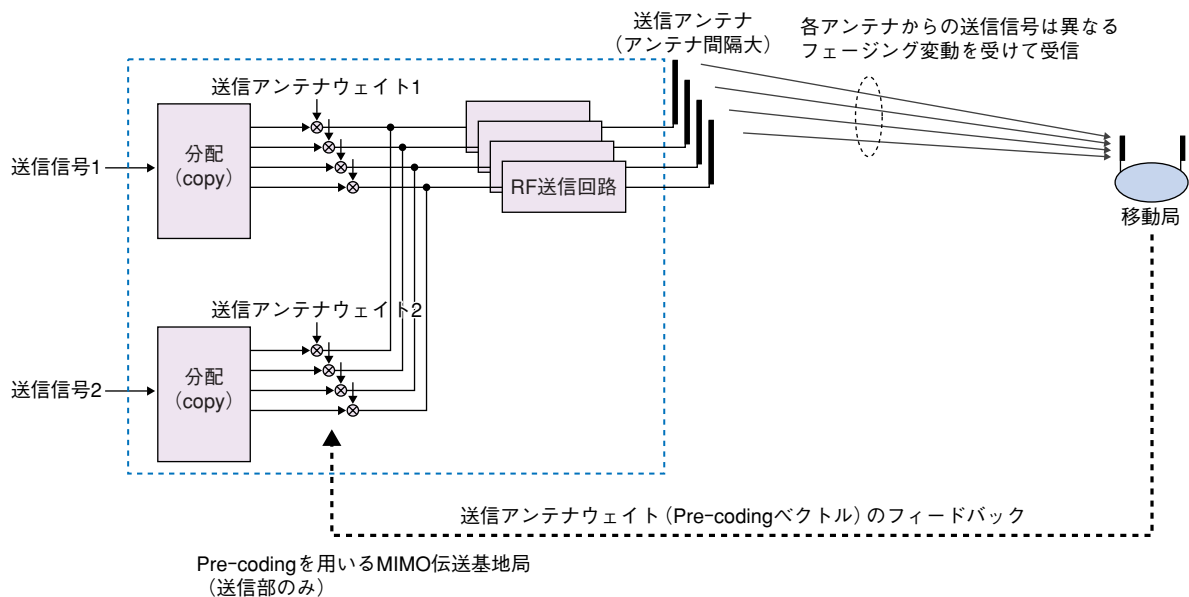


図4 Pre-codingを用いるMIMO伝送法の基本構成

*9 周波数分割複信：上りリンクと下りリンクで、異なるキャリア周波数、周波数帯域を用いて信号伝送を行う方式。

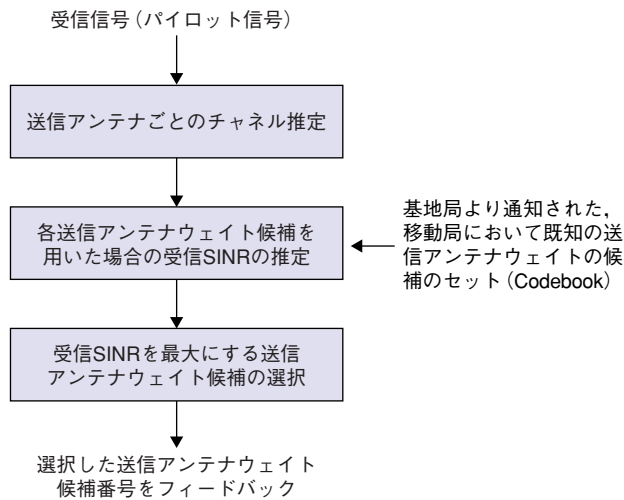


図5 Codebookを用いた送信アンテナウェイト選択フロー

通知される送信アンテナウェイト情報は、基地局RF送信回路固有の振幅/位相偏差^{*10}も含んだチャンネル変動の推定値に基づいて選択されるため、RF回路キャリブレーションは不要となる。なお、送受信で同じキャリア周波数を用いる時分割複信（TDD：Time Division Duplex）^{*11}では、上りリンクを用いて下りリンクのチャンネル変動を推定する場合、フィードバック情報が不要となるが、RF回路キャリブレーションが必要となる。

以上のように、Pre-codingを用いるMIMO伝送法は、アンテナ間隔が広いためにフィードバック情報が原則必要となるものの、アンテナ間のフェージング相関が小さいため、指向性送信による平均受信電力の増大効果に加えてスペースダイバーシチ効果が得られる利点がある。

AAA-BF送信法とPre-codingを用いるMIMO伝送法の主な相違点を表1に示す。

表1 AAA-BF送信法とPre-codingを用いるMIMO伝送法の比較

	AAA-BF送信法	Pre-codingを用いるMIMO伝送法
送信アンテナ間隔	小	大
回路キャリブレーション	必要	不要
フィードバック情報	不要	必要
送信アンテナごとの直交パイロットチャンネル	必ずしも必要でない	必要
指向性送信する個別パイロットチャンネル	必要	必ずしも必要でない
送信ダイバーシチ効果	小	大

*10 振幅/位相偏差：各アンテナブランチのRF回路中における増幅器などの能動素子の個体差やRFケーブル長差に起因する振幅成分および位相成分の変動量の差。

*11 時分割複信：上りリンクと下りリンクで、同じキャリア周波数、周波数帯域を用いて時間スロットで分割して信号伝送を行う方式。

3. 適用領域と実用に向けた技術課題

3.1 適用領域

2章で述べたように、AAA-BF送受信法とPre-codingを用いるMIMO伝送法は、共に指向性送信による伝送品質の改善をねらった方式であり類似点が多いが、その技術的特徴から、必ずしも互いに競合する技術ではなく、ある程度異なる適用領域を有する互いに補完しあう技術と考えられる。

AAA-BF送受信法は、移動局のDOAや平均受信電力といった比較的変動の緩やかなチャンネル状態に応じて指向性ビームの制御を行うため、高速移動ユーザに対しても十分な効果を得ることができる。また、アンテナ間隔が小さいため、実際のアンテナの設置を考えるとアンテナ数の増大がPre-codingを用いるMIMO伝送法に比較して容易である。さらに直交パイロットチャンネルおよび移動局からのフィードバック情報が不要なため、送信アンテナ数が増大したときのオーバーヘッドの増大が小さい。しかしながらアンテナ間隔が小さいため、MIMO多重法に切り替えて1ユーザを対象とするピークデータレートの増大を実現することが困難である。これは、アンテナ間隔が小さい場合、フェージング変動の相関が高く、MIMO多重法においてアンテナごとの伝搬路変動の違いを利用した信号分離が劣化するためである。したがって、AAA-BF送受信法は、セル半径の大きなマクロセル環境において、カバレレッジエリアの増大ないしはセル端のユーザのデータレートの増大、またはSDMAによるリンク容量の増大を実現するのに特に適している。

一方、Pre-codingを用いるMIMO伝送法は、瞬時チャンネル変動に追従したフィードバックが必要であり、高速移動ユーザに対しては、AAA-BF送受信法と比較して指向性送信利得が劣化する。また、アンテナ間隔が大きいことや、さらにアンテナ数の増大に伴う直交パイロットチャンネルおよび移動局からのフィードバック情報によりオーバーヘッドが増大するため、アンテナ数を4～6程度以上に増大することがやや困難である。しかしながら、アンテナ間隔が大きいPre-codingを用いるMIMO伝送法は、チャンネル状態が良い（基地局の近傍など）場合は、1ユーザに複数の送信信号を同時送

信する（図4において、送信信号1, 2を同一ユーザに送信する）MIMO多重法によりピークのデータレートも増大できる利点がある。チャンネル状態に応じてMIMO伝送法を切り替える制御の模式図を図6に示す。このような制御はRank adaptation^{*12}もしくはMIMO mode selectionと呼ばれ、Evolved UTRA (Universal Terrestrial Radio Access) での適用も検討されている[14]~[16]。したがって、Pre-codingを用いるMIMO伝送法は、AAA-BF送受信法に比較してトラフィックが大きく、セル半径がやや小さいセル環境への適用がより適すると考えられる。

3.2 実用に向けた技術課題

本節では、本シリーズその1で記したマルチアンテナ技術全般の技術課題に加えて、特にAAA-BF伝送法、Pre-codingを用いるMIMO伝送法で課題となる項目を示す。

(1) パケット伝送に適した制御

今後の無線通信システムは、パケット伝送に特化したものになると考えられる。パケット伝送では、上下リンクのトラフィックは非対称となり、また、各ユーザのデータ伝送は不連続となる。この場合、AAA-BF送受信法において、適応アルゴリズム^{*13}を用いて上りリンクで生成した受信アンテナウェイトを下りリンク送信に用いることができない。そこで、上りリンクでサブフレーム内のパイロットチャンネルを用いて、各受信ユーザのDOA、平均受信電力を推定しておき、下りリンクでは実際に送信するユーザのDOA、平均受信電力に応じて、送信アンテナウェイトを生成するアプローチが必要となる[17]~[21]。Pre-codingを用いるMIMO伝送法の場合は、実際にデータを送信するユーザに加えて、スケジューラに登録されている他の複数のデータ送信希望ユーザからもフィードバック情報を送る必要があるため、フィードバック情報伝送の高効率化が必要である。

さらに、AAA-BF送受信法およびPre-codingを用いるMIMO伝送法において複数ユーザの送信信号に対してSDMAを適用する場合、指向性ビーム送信を考慮し、どの

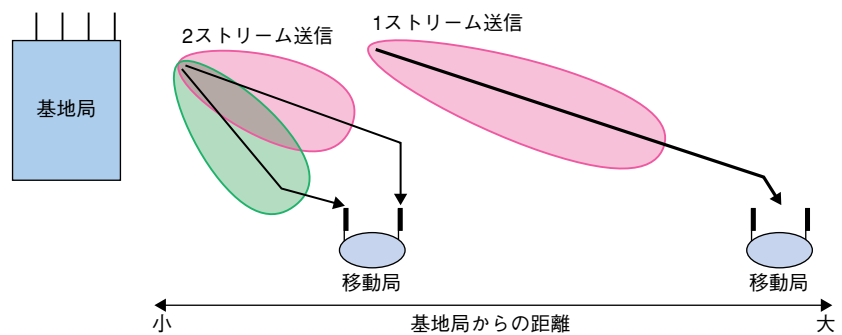


図6 Rank adaptation の概念図

ユーザにデータ伝送を許可するかを決定するパケットスケジューリングの最適化が今後の重要な検討課題である。

(2) 共通チャンネル構成

AAA-BF送受信法およびPre-codingを用いるMIMO伝送法では、データチャンネルは通信先のユーザでのみ受信できるよう指向性ビーム送信される。一方、制御チャンネル、同期チャンネルなどの呼の接続に必要な共通チャンネルは、セクタ内のすべてのユーザで受信できるよう、セクタビームで送信される必要がある。また、Pre-codingを用いるMIMO伝送法では、送信アンテナごとの直交パイロットチャンネルが送信アンテナウェイトの生成に必要である。これらの物理チャンネルを無線リソースの観点から高効率に多重し、かつ複数のアンテナおよび送信電力増幅器を高効率に用いた実際の送信法の検討が必要である。

(3) マルチアンテナ

AAA-BF送受信法およびPre-codingを用いるMIMO伝送法によってカパレッジエリアの増大を実現するためには、小型・高利得アンテナの実現に加えて、屋外の無線装置とアンテナ間や屋外の無線装置と建物内に設置される基地局装置間の給電ケーブルの省スペース化および低損失化が重要な課題である。

(4) RF回路キャリブレーション

AAA-BF送受信法は、RF回路キャリブレーションが必要となる。広ダイナミックレンジのRF回路に対して、通信を中断することなくオンラインでキャリブレーションする実用的な構成の実現が重要な課題である。

4. あとがき

本シリーズでは4回にわたり、MIMOチャンネルを用いた

*12 Rank adaptation/MIMO mode selection：チャンネル状態（受信SINRおよびアンテナ間のフェージング変動の相関）に応じて、MIMO伝送法を切り替えることにより、同一の周波数および同一の時間スロットで並列伝送する信号系列数（Rank）を適応的に切り替えること。

*13 適応アルゴリズム：本稿では、各アンテナの受信信号を用いて、LMS (Least Mean Square) やRLS (Recursive Least Square) と呼ばれるMMSE規範のアンテナウェイトを適応的に生成するアルゴリズムを指す。

無線信号伝送技術について、MIMO多重法、MIMOダイバ
ーシチ法、AAA-BF送受信法およびPre-codingを用いる
MIMO伝送法の特徴と技術課題を述べた。これらの方式は
それぞれ異なる特徴を有しており、無線伝搬環境に応じて
最適な信号伝送法を適用することにより、システム容量の
増大、カバレレッジエリアの拡大、伝送レートの向上に非常
に有効である。

文 献

- [1] R.T. Compton, Jr.: "An Adaptive Antenna in a Spread-Spectrum Communication System," Proc. IEEE, Vol. 66, pp. 289-295, Mar. 1978.
- [2] S.C. Swales, M.A. Beach, D.J. Edwards and J.P. McGeehan: "The Performance Enhancement of Multibeam Adaptive Base-Station Antennas for Cellular land Mobile Radio Systems," IEEE Trans. Veh. Technol., Vol. 39, pp. 56-67, Feb. 1990.
- [3] I. Emre Telatar: "Capacity of Multi-Antenna Gaussian Channels," European Transactions on Telecommunications, Vol. 10, No. 6, pp. 585-595, Nov/Dec 1999.
- [4] J. Pautler, M. Ahmed and K. Rohani: "On Application of Multiple-Input Multiple-Output Antennas to CDMA Cellular Systems," Proc. IEEE VTC2001Fall, Oct. 2001.
- [5] Q. Li and X. E. Lin: "Compact Feedback for MIMO-OFDM System over Frequency Selective Channels," Proc. IEEE VTC2005-Spring, Vol. 1, pp. 187-191, May-June, 2005.
- [6] B. Widrow, P. E. Mantey, L. J. Griffiths and B. B. Goode: "Adaptive Antenna Systems," Proc. IEEE, Vol. 55, No. 12, pp. 2143-2159, Dec. 1967.
- [7] S. Tanaka, A. Harada, M. Sawahashi and F. Adachi: "Experiments on Coherent Adaptive Antenna Array Diversity for Wideband DS-CDMA Mobile Radio," IEEE J.Select.Areas Commun., Vol. 18, pp. 1495-1504, Aug. 2000.
- [8] A. Harada, S. Tanaka, M. Sawahashi and F. Adachi: "Performance of Adaptive Antenna Array Diversity Transmitter for W-CDMA Forward Link," Proc. IEEE PIMRC'99, pp. 1134-1138, Sep. 12-15, 1999.
- [9] M. Kitahara, Y. Ogawa and T. Ohgane: "A Base Station Adaptive Antenna for Downlink Transmission in a DS-CDMA System," in Proc. IEEE VTC2000-Spring, Vol. 2, pp. 710-715, May 2000.
- [10] H. Taoka, S. Tanaka, T. Ihara and M. Sawahashi: "Adaptive Antenna Array Transmit Diversity in FDD Forward Link for W-CDMA and Broadband Packet Wireless Access," IEEE Wireless Commn., Vol. 9, No. 2, pp. 34-41, Apr. 2002.
- [11] D.J. Love, R.W. Heath and T. Strohmer Jr.: "Grassmannian Beamforming for Multiple-Input Multiple-Output Wireless Systems," IEEE Trans. Inform. Theory, Vol. 49, No. 10, pp. 2735-2747, Oct. 2003.
- [12] W. Santipach and M. L. Honig: "Asymptotic Performance of MIMO Wireless Channels with Limited Feedback," Proc. IEEE Mil. Commun. Conf., Vol. 1, pp. 141-146, Oct. 2003.
- [13] D.J. Love and R.W. Heath Jr.: "Limited Feedback Unitary Precoding for Spatial Multiplexing Systems," IEEE Trans. Inform. Theory, Vol. 51, pp. 2967-2976, Aug. 2005.
- [14] R. W. Heath Jr. and A. Paulraj: "Switching Between Diversity and Multiplexing in MIMO Systems," IEEE Trans. Commun., Vol. 53, No. 6, pp. 962-968, Jun. 2005.
- [15] A. Forenza, A. Pandharipande, H. Kim and R.W.Heath Jr.: "Adaptive MIMO Transmission Scheme: Exploiting the Spatial Selectivity of Wireless Channels Vehicular Technology Conference," Proc. IEEE VTC 2005-Spring, Vol. 5, pp. 3188-3192, May 2005.
- [16] P. Xia, S. Zhou and G.B. Giannakis: "Adaptive MIMO-OFDM Based on Partial Channel State Information," IEEE Trans. on Sig. Process., Vol. 52, No. 1, pp. 202-213, Jan. 2004.
- [17] A. Kucher, M. Tangemann and E. Bonek: "A Real-Time DOA-Based Smart Antenna Processor," IEEE Trans. Veh. Technol., Vol. 51, No. 6, pp. 1279-1293, Nov. 2002.
- [18] T. Kataoka, H. Taoka, K. Higuchi and M. Sawahashi: "Adaptive Antenna Array-Beam Forming with Simultaneous Received Path Timing and DOA Estimations Based on Two-Dimensional Power Profile in Broadband CDMA Reverse Link," Proc. IEEE ISSSE 2004, Aug. 2004.
- [19] M. Kitahara, T. Miyatani, Y. Ogawa and T. Ohgane: "Adaptive Array Antennas for Downlink Transmission in a W-CDMA System," IEICE Trans. Commun., Vol. J85-B, No. 9, pp. 1665-1668, Sep. 2002.
- [20] H. Taoka, T. Kataoka, K. Higuchi and M. Sawahashi: "Optimum Beam Generation Method of Adaptive Antenna Array-Beam Forming Transmitter for OFCDM Broadband Packet Wireless Access in Forward Link," Proc. WPMC2004, Vol. 3, pp. 502-506, Sep. 2004.
- [21] 田岡 秀和, 片岡 卓士, 樋口 健一, 佐和橋 衛: "下りリンク Spread-OFDM ブロードバンドパケット無線アクセスにおける適応指向性送信ビームを用いた空間分割多重の屋外実験結果," 信学技報RCS2005-13, pp. 37-42, 2005年4月.