

マルチユーザ MIMO の基礎

Basic Theory and Performance on Multi-user MIMO

西森健太郎

Abstract

近年のスマートフォンや無線 LAN の普及に伴い、限られた周波数帯域で通信速度を向上させることが求められている。送信と受信アンテナを複数とし、複数のアンテナから異なるデータを送受信することで通信速度を向上させる技術として、Multiple Input Multiple Output (MIMO) 伝送技術が IEEE802.11n 規格の無線 LAN や LTE に商用導入されている。更に、複数の小形端末と基地局の間で MIMO 伝送を行うマルチユーザ MIMO (MU-MIMO) 技術も注目されており、IEEE802.11ac 規格の無線 LAN や LTE-Advanced で採用される予定である。本稿では、MU-MIMO の概念を解説するとともに、MU-MIMO を実現するための技術として、ブロック対角化を紹介する。最後に、MU-MIMO 伝送の基本特性について示す。

キーワード：マルチユーザ MIMO, ブロック対角化法, ヌル, 非線形制御法

1. ま え が き

無線通信システムでは、「限られた周波数帯域においていかに伝送速度を向上させるか」が大きな課題であり、様々な技術によりこの課題は克服されてきた。21 世紀に入り、Code Division Multiple Access (CDMA) を基本とする第 3 世代移動通信システムが導入され、最新の商用システムである、Long Term Evolution (LTE)⁽¹⁾ や IEEE802.11n 準拠の無線 LAN⁽²⁾ では伝送速度が 100 Mbit/s を超え、ユーザにとって非常に利便性の高いサービスが実現されている。LTE や IEEE802.11n 標準化では、送信局と受信局の両方に複数のアンテナを用い、複数のアンテナから同時に異なる信号を送信し、受信側でそれらの信号を復号する Multiple Input Multiple Output (MIMO) 伝送が、キー技術として採用されている⁽³⁾。MIMO 技術は、このようにいまや無線通信システムにとって欠かせない技術となっている。

MIMO 技術が商用化されたことをきっかけに、主に端末局の規模を増大させない観点から、基地局に多くの

アンテナを有し、複数の端末の伝搬チャネル^(用語)を仮想的に大規模な MIMO チャネルとみなして基地局と複数端末で MIMO 伝送を実現するマルチユーザ MIMO (MU-MIMO) 技術⁽⁴⁾が検討されている。

MU-MIMO 技術は、最新の無線 LAN 及び携帯電話システムである、IEEE802.11ac や LTE-Advanced で採用されており、現在最もホットな技術であると考えられる。本稿では、MU-MIMO の基本概念と研究課題について解説するとともに、MU-MIMO を実現するための必須技術として、指向性制御技術について解説する。その中で、比較的現実的な計算負荷で実現可能な指向性制御技術の一つとして知られている、ブロック対角化法 (Block Diagonalization, BD 法)⁽⁵⁾について解説する。また、最近注目されている非線形制御法に関する概念について説明する。最後に、BD 法の基本特性を理論限界性能と比較した結果について示す。

以下、本稿の構成を述べる。2. では、MU-MIMO の基本概念と研究課題について解説する。3. では、BD 法の原理について説明する。更に、BD 法の特性を含めた MU-MIMO の基本特性を 4. で示す。

2. MU-MIMO の概念と技術課題

MIMO 技術は、空間領域におけるアレーアンテナを用いた信号処理技術であると解釈できる。空間領域にお

西森健太郎 正員：シニア会員 新潟大学工学部情報工学科
E-mail nishimori@m.ieice.org
Kentaro NISHIMORI, Senior Member (Faculty of Engineering, Niigata University, Niigata-shi, 950-2181 Japan).
電子情報通信学会誌 Vol.97 No.4 pp.274-279 2014 年 4 月
©電子情報通信学会 2014

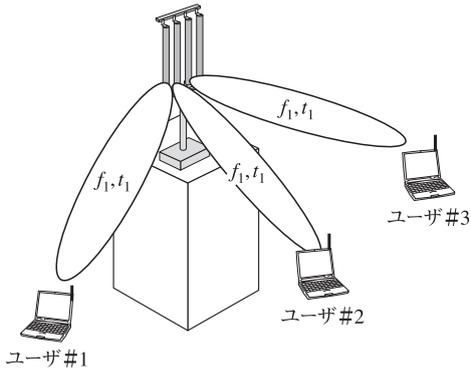


図1 Space Division Multiple Access (SDMA) の概念図 (f_1 : 周波数, t_1 : 時間)

けるアレーアンテナを用いた信号処理技術として MIMO とは異なる手法で、システム全体の周波数利用効率を向上させる技術がこれまで検討されてきた。これは、Space Division Multiple Access (SDMA) と呼ばれる技術であり、ちょうど MIMO 技術の提案から少し前にそのコンセプトが提案されている。図1に SDMA の概念図を示す。SDMA は図に示すように、アダプティブアレーアンテナ⁽⁴⁰⁾を基地局側に用いて複数の異なる指向性を形成することで、同一時間 (t_1)、同一周波数 (f_1) で複数のユーザと通信することを可能とする。

通常、SDMA では、図1に示すようにユーザ側のアンテナ数は1であるが、SDMA に MIMO の考え方を導入することも可能である。これは、ユーザ側のアンテナを複数にすることである。ただし、ユーザ側にはハードウェア規模の制約から、多くのアンテナを有することが困難である。そこで、基地局には多くのアンテナを有し、複数のユーザと基地局の間における MIMO による通信を実現することを考える。これは、一般にマルチユーザ MIMO (MU-MIMO) と呼ばれている。

図2に Single User (SU)-MIMO と MU-MIMO における主要技術課題を示す。また、SU-MIMO, MU-

用語解説

伝搬チャネル 送信アンテナと受信アンテナの間の伝搬路における応答を表す。MIMO の場合、送信アンテナ×受信アンテナ数が応答数となる。

アダプティブアレーアンテナ アレーアンテナに振幅と位相の重み付けと合成を行うことで、干渉信号を除去する技術。重み付けを決定する手法として、MMSE (Minimum Mean-Square Error) 法などがある。

チャネル容量 SN 比を与えたときの理論上実現可能な伝送速度であり、単位周波数当りのビットレートで表現される。MIMO 伝送では送受のアンテナ数を増加させることで SISO 伝送のアンテナ数倍になることが知られている。

固有モード伝送 伝搬チャネル行列を特異値分解したときに、送信と受信ウェイトに右及び左特異行列を用いることで、MIMO 伝送において最大容量を得る方式である。

MIMO の両方において上り回線 (ユーザ→基地局)、下り回線 (基地局→ユーザ) ごとに課題が異なることから、それぞれの場合の課題について示している。図の例では、基地局がユーザよりも多くのアンテナを有し (基地局のアンテナ数: 4)、ユーザは2本のアンテナを持ち、2個のデータを同時に送信若しくは受信する状況を想定している。MU-MIMO の場合は、2ユーザが同時に基地局と通信することを想定している。

まず、SU-MIMO の場合の上り回線を考える。上り回線 (下り回線) において、基地局 (ユーザ) が複数の異なる信号 (図2の場合、 s_1, s_2) を同時に受信する必要がある。このとき、受信アンテナに入力される信号は s_1, s_2 がお互いに混ざった信号となる。これは、上り回線だけでなく下り回線でも同じ問題が発生する。すなわち、上り回線/下り回線に関係なく、受信側では複数の信号を分離する技術 (信号分離技術) が必須となる⁽³⁾。

次に、SU-MIMO における下り回線の課題を考える。ここでは、基地局のアンテナ数がユーザのそれよりも多いことを考えているため、図2の場合では、同時に送信できる信号数は基地局のアンテナ数によらず2となる。このとき、基地局のアンテナ数がユーザのアンテナ数よりも多くなる場合の MIMO 伝送方法として、送信側指向性制御技術を用いることが提案されている⁽³⁾。

最後に、MU-MIMO に関する課題について説明する。MU-MIMO の場合、SU-MIMO における技術をそのまま適用できる場合と、そのまま適用できない場合がそれぞれ存在する。まず上り回線に着目すると、複数ユーザの総アンテナ数が基地局のアンテナ数以下であれば、SU-MIMO における受信側信号分離技術がそのまま適用できる。図2において、基地局はユーザ1の信号 $s_1^{(1)}, s_2^{(1)}$ 、ユーザ2の信号 $s_1^{(2)}, s_2^{(2)}$ を4個の異なる信号とみなし、これらの信号に対する信号分離技術を適用すればよい。

MU-MIMO における上り回線では SU-MIMO の技術が適用できるのに対し、MU-MIMO の下り回線では、MU-MIMO 独自の技術が必要となる⁽⁴⁾。先に述べたように、SDMA では対象とするユーザ以外のユーザの方向に指向性のヌルを形成する。SU-MIMO における送信側指向性制御では、当然ながら他ユーザに対する指向性のヌル形成は考慮しない。所望のユーザへの信号が他ユーザに届くと、これは干渉となる。ユーザ間では一般にデータのやり取りはできないので、ユーザは他ユーザのために基地局から送信された信号 (干渉信号) を取り除くすべがない。したがって、MU-MIMO の下り回線では、他ユーザへの干渉を回避する送信側指向性制御技術が必須となる。よって、3. では、下り回線における指向性制御技術について解説する。更に、MU-MIMO では、基地局と通信するユーザの組合せによって、MU-MIMO の性能が大きく変化する。すなわち、ユー-

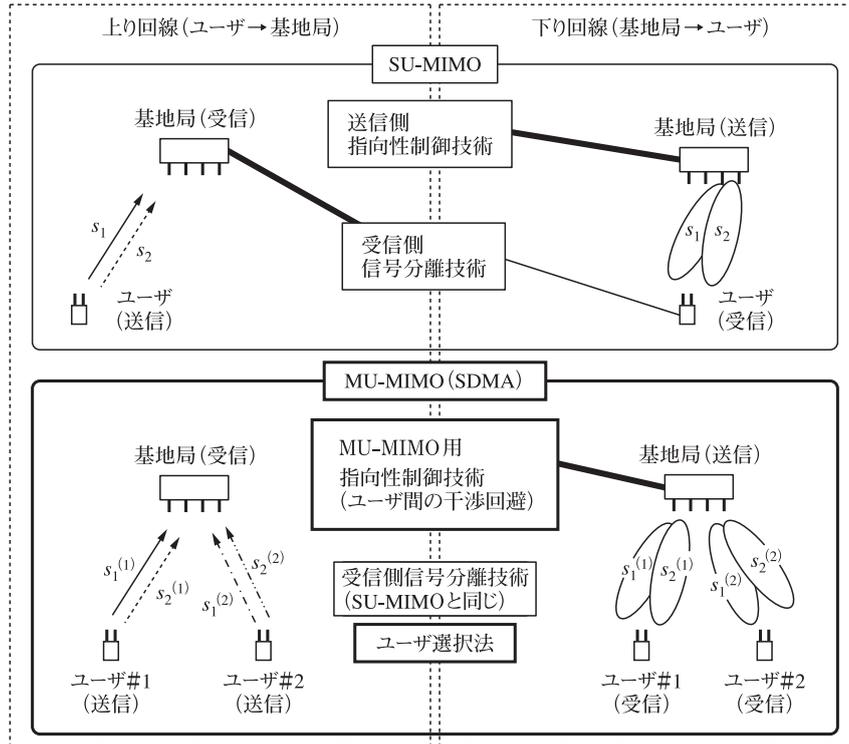


図2 SU-MIMO/MU-MIMO における主要技術課題

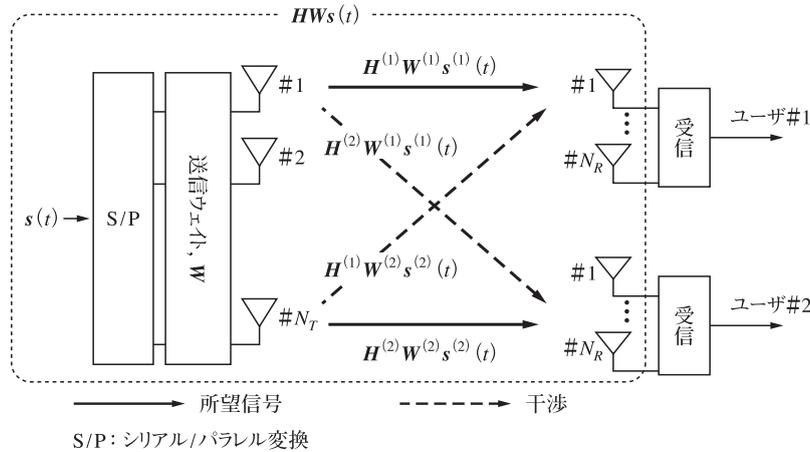


図3 下り回線における MU-MIMO のシステムモデル ($N_U=2$)

ザの組合せを最適化するためのが課題となる。ユーザスケジューリングの効果については、4. で解説する。

3. MU-MIMO における下り回線指向性制御技術

3.1 線形演算による指向性制御技術

ここでは、MU-MIMO の下り回線の指向性制御技術として、BD 法について解説する。図3の MU-MIMO の下り回線のシステムモデルを示す。理解を簡単にするために、基地局 (送信局) アンテナ数 N_T 、端末局 (受信局) アンテナ数 N_R 、ユーザ数 $N_U=2$ とする。すなわ

ち、 $N_R N_U \times N_T$ 通りの伝搬チャネル応答が全体では形成されることとなる。 $N_U=2$ の場合、図3の送信信号ベクトル $\mathbf{s}(t)$ 、チャネル行列 \mathbf{H} 、ウェイト行列 \mathbf{W} は、それぞれ以下の式で与えることができる。なお、上添え字の T は行列及びベクトルの転置を表す。

$$\mathbf{s}(t) = [(\mathbf{s}^{(1)}(t))^T (\mathbf{s}^{(2)}(t))^T]^T \quad (1)$$

$$\mathbf{H} = [(\mathbf{H}^{(1)})^T (\mathbf{H}^{(2)})^T]^T \quad (2)$$

$$\mathbf{W} = [\mathbf{W}^{(1)} \mathbf{W}^{(2)}] \quad (3)$$

図3において、受信機で発生する熱雑音を無視する

と、受信信号は $\mathbf{H}\mathbf{W}\mathbf{s}(t)$ で表される。また、図3において、 $\mathbf{H}^{(1)}\mathbf{W}^{(1)}\mathbf{s}^{(1)}(t)$ 、 $\mathbf{H}^{(2)}\mathbf{W}^{(2)}\mathbf{s}^{(2)}(t)$ はそれぞれユーザ1, 2に対する送信信号とチャネル行列の積であることが分かる。よって、これらがユーザ1, 2にそれぞれ送信されるべき情報となる。一方、 $\mathbf{H}^{(1)}\mathbf{W}^{(2)}\mathbf{s}^{(2)}(t)$ 、 $\mathbf{H}^{(2)}\mathbf{W}^{(1)}\mathbf{s}^{(1)}(t)$ はそれぞれユーザ1, 2に対する干渉信号となる。したがって、

$$\mathbf{H}^{(1)}\mathbf{W}^{(2)}\mathbf{s}^{(2)}(t) = \mathbf{0}_{N_R \times 1} \quad (4)$$

$$\mathbf{H}^{(2)}\mathbf{W}^{(1)}\mathbf{s}^{(1)}(t) = \mathbf{0}_{N_R \times 1} \quad (5)$$

が満たされるように、 $\mathbf{W}^{(1)}$ 、 $\mathbf{W}^{(2)}$ が決定できれば、ユーザ1と2には干渉が届かない。ここで、 $\mathbf{0}_{N_R \times 1}$ は $N_R \times 1$ のゼロベクトルである。

図4に、図3の例においてBD法により形成される空間チャンネル(ユーザ1)を示す。図4に示すように、BD法は、

$$\mathbf{H}\mathbf{W} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}^{(1)}\mathbf{W}^{(1)} & \mathbf{0}_{N_R \times (N_T - N_R)} \\ \mathbf{0}_{N_R \times (N_T - N_R)} & \mathbf{H}^{(2)}\mathbf{W}^{(2)} \end{bmatrix} \quad (6)$$

となるようにウェイト \mathbf{W} を決定する。これは、式(4)、(5)の条件を満たすためのウェイトの条件である。また、式(6)から分かるように、伝搬チャンネル行列 \mathbf{H} がウェイト \mathbf{W} の乗算によりブロック対角化されていることが分かる。これが、本手法がBD法と呼ばれる理由である⁽⁵⁾。

次に、具体的に $\mathbf{W}^{(1)}$ 、 $\mathbf{W}^{(2)}$ を求める方法について説明する。 $\mathbf{W}^{(1)}$ 、 $\mathbf{W}^{(2)}$ を求めるために、ユーザ2, 1の伝搬チャンネル行列 $\mathbf{H}^{(2)}$ 、 $\mathbf{H}^{(1)}$ に対し特異値分解を適用する。ここで、 $N_T > N_R$ の関係が存在すると、特異値分解においてゼロの値を有する固有値に対応する固有ベクトルで形成される行列、 $\mathbf{V}_n^{(2)}$ 、 $\mathbf{V}_n^{(1)}$ が得られる⁽⁵⁾。これらの行列は、

$$\mathbf{H}^{(1)}\mathbf{V}_n^{(2)} = \mathbf{H}^{(2)}\mathbf{V}_n^{(1)} = \mathbf{0}_{N_R \times (N_T - N_R)} \quad (7)$$

の関係を持つ。したがって、 $\mathbf{W}^{(1)} = \mathbf{V}_n^{(2)}$ 、 $\mathbf{W}^{(2)} = \mathbf{V}_n^{(1)}$ とすれば、他ユーザには干渉を与えずにMU-MIMO伝送が実現できる。図4は、 $\mathbf{W}^{(1)}$ によるユーザ1に形成される伝搬チャンネルを表しているが、BD法によりユーザ2には電波が届かないようにすることができる⁽⁴⁾。

BD法のように、ウェイト \mathbf{W} がある値で一意に求めることができる指向性制御法を線形制御法と呼ぶ。線形制御法としては、BD法のほかに、ZF (Zero-Forcing) 法やMMSE (Minimum Mean-Square Error) 法などが広く知られている⁽⁴⁾。

3.2 非線形制御技術

先に述べたZFなどの線形制御法では、干渉信号を完全に0にすることを可能とするが、所望信号の利得最大化は保証できていない。非線形制御法はこの問題を解決するために検討されている^{(6),(7)}。図5に線形制御法と非線形制御法による指向性形成(ユーザ1用)のイメージ図を示す。図5(a)から、線形制御法ではユーザ2には信号は到来しない。この拘束条件のため、ユーザ間の到来方向が近い場合やユーザが近接する場合において、ユーザ1への指向性が最大方向とならない。一方、非線形制御法におけるユーザ1に対するウェイトは、ユーザ1への利得が最大となるように求められる。すなわち、ユーザ2に対しては指向性のヌルを形成しない。この条件を得るための最適条件は最大比合成⁽³⁾である。ただし、このままではユーザ2に干渉が発生するので、送信側で送信信号をあらかじめ、“加工”することで、ユーザ2側では簡単な処理のみで、干渉信号を受けないようにすることができる。

送信側で既知の干渉があらかじめ分かっているとすると、受信側では干渉がない場合と全く同じチャンネル容量^(用語)を実現できる符号が存在する。これは Dirty Pa-

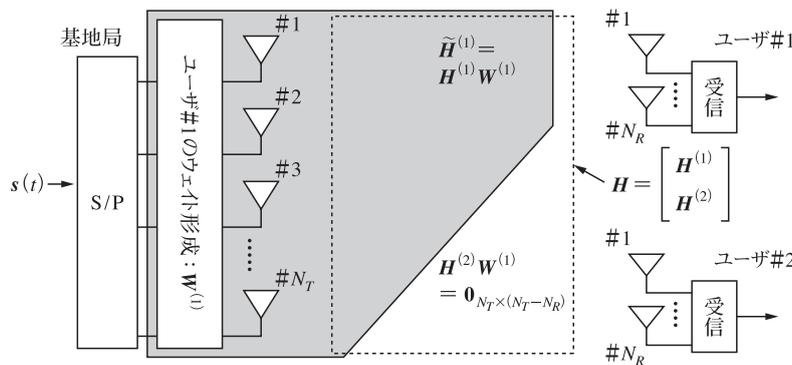


図4 BD法により形成される空間チャンネル ($N_U=2$)

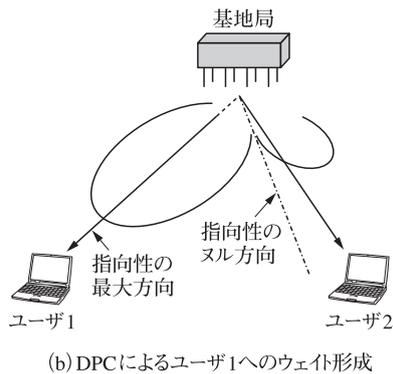
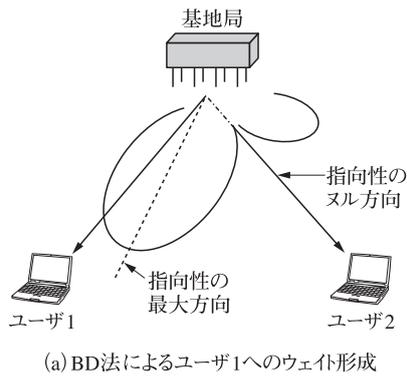


図5 線形制御法と非線形制御法による指向性形成の比較

per Coding (DPC) と呼ばれている⁽⁶⁾が、完全に DPC を実現できないため、近似的に DPC を実現するための手法が提案されている^{(6), (7)}。なお、非線形制御の詳細については、本小特集 7.⁽⁸⁾ に詳細に解説されているので、そちらを参照されたい。

4. MU-MIMO 下り回線の基本特性

本章では、BD 法を用いた MU-MIMO 下り回線の基本特性を示す。図 6 は、 $N_T=4, N_R=2, N_U=2$ とした場合の Signal to Noise power Ratio (SN 比) に対する Bit Error Rate (BER) 特性を示す。トータルのビットレートを 8 bits/symbol とした。DPC は、 $N_T=4, N_R=4$ で実現される固有モード伝送^(用語)の特性から得た。まず、図から分かるように、線形制御法である BD 法の特性は DPC に比べ大きく劣化することが分かる。

その対策として、図 6 には、選択できるユーザー数の候補を変化させた場合の BER 特性の改善効果を示している。図 6 において、表示しているユーザー数 (N_U) は、ユーザー 1 以外の全てのユーザー ($2 \sim N_U$) がユーザー 1 と組合せ可能であることを示している。よって、ユーザー数 (N_U) に対しては N_U-1 通りのユーザーの組合せが存在する。各ユーザーの平均 SN 比は同一としている。図 6 から、選択可能なユーザーが一人増えるだけで、 $BER=10^{-3}$ における SN 比が 2.5 dB 程度低減できる。

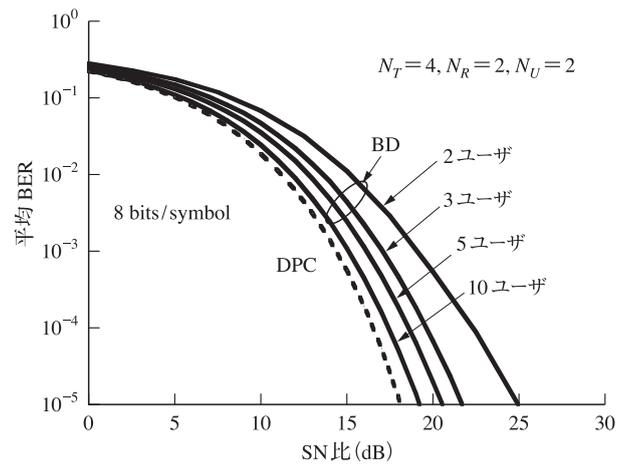


図 6 BD 法におけるユーザー選択による BER 特性改善効果 ($N_T=4, N_R=2, N_U=2, K=0$)

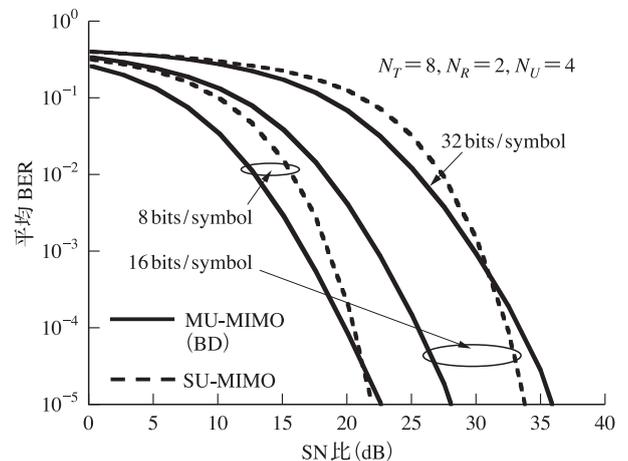


図 7 SN 比に対する BER 特性 ($N_T=8, N_R=2, N_U=4, K=0$)

更に、選択できるユーザー数が 9 ユーザー存在すると、 $BER=10^{-3}$ における DPC からの SN 比の劣化は 1 dB 以内となる。このように、ユーザースケジューリングは MU-MIMO において非常に有効な手段であると言える。一方、ユーザースケジューリングをするためには、通常より多くの制御信号を必要とするため、ユーザースケジューリングと性能に関してはトレードオフの関係が存在する。

図 7 は、 $N_T=8, N_R=2, N_U=4$ とした場合の BER 特性を、MU-MIMO (BD 法) と SU-MIMO (固有モード伝送) で比較した。SU-MIMO では、その伝送を N_U ユーザー分の時間で分けた場合の特性となる。図にはトータルのビットレートが 8, 16, 32 bits/symbol となる場合の特性を示した。図 7 から分かるように、トータルのビットレートを 8, 16 bits/symbol とした場合において、BD 法により $BER=10^{-3}$ における SN 比を 2.5,

8 dB 程度低減できる。

なお、SU-MIMO において 32 bits/symbol でデータを送信するためには、1 本のアンテナ当り 16 bits/symbol のデータ送信が必要となる。このためには、65,536(=2¹⁶) QAM を使用することが必要となり、実用上は実現不可能である。よって、図 7 には、SU-MIMO の場合の 32 bits/symbol の結果は図示していない。なお、MU-MIMO ではユーザ当りのビットレートは 8 bits/symbol (=32/4) であり、これは、各ユーザに 1 個のデータしかそれぞれ送信しないとしても、256 QAM の適用で実現可能となる。

5. ま と め

端末を小形化しながらシステムの周波数利用効率を向上させる手段として、MU-MIMO 技術が検討され、最新の無線システムに導入されている。本稿では、MU-MIMO の基本概念と課題、及び下り回線における MU-MIMO の指向性制御技術について解説した。MU-MIMO の下り回線では、端末同士が協調できないことから、基地局側での指向性制御が必要であることを示した。また、基地局の指向性制御技術として、BD 法の原理について述べた。最後に、MU-MIMO の下り回線における基本特性を示した。MU-MIMO は端末素子数が少ない場合に、基地局数の増加に伴い有効であること、使用するユーザをスケジューリングすることが重要であることを明らかにした。

謝辞 本研究の一部は、科研費（基盤研究(C), 25420362) の助成により行われたものである。

文 献

- (1) 3GPP LTE, <http://www.3gpp.org/article/1te>
- (2) IEEE 802.11n, <http://www.ieee802.org/11n/>
- (3) 大鐘武雄, 小川恭孝, わかりやすい MIMO システム技術, オーム社, 東京, 2009.
- (4) 鷹取泰司, 西森健太郎, “次世代高速無線アクセスシステムへの下りリンクマルチユーザ MIMO 技術の適用,” 信学論(B), vol. J93-B, no. 9, pp. 1127-1139, Sept. 2010.
- (5) Q.H. Spencer, A.L. Swindlehurst, and M. Haardt, “Zero forcing methods for downlink spatial multiplexing in multiuser MIMO channels,” IEEE Trans. Signal Process., vol. 52, no. 2, pp. 461-471, Feb. 2004.
- (6) M. Tomlinson, “New automatic equaliser employing modulo arithmetic,” Electron. Lett., vol. 7, no. 5/6, pp. 138-139, March 1971.
- (7) C.B. Peel, B.M. Hochwald, and A.L. Swindlehurst, “A vector-perturbation technique for near-capacity multiantenna multiuser communication: Part I: Channel inversion and regularization,” IEEE Trans. Commun., vol. 53, no. 1, pp. 195-202, Jan. 2005.
- (8) 矢野一人, 塚本悟司, 蘭部聡司, 俣 亜飛, 伴 弘司, 宇野雅博, 小林 聖, “ベクトル摂動に基づく非線形マルチユーザ MIMO 伝送システムの開発及びフィールド検証結果,” 信学誌, vol. 97, no. 4, pp. 307-312, April 2014.

(平成 25 年 11 月 4 日受付 平成 25 年 12 月 19 日最終受付)



にしもり けんたろう
西森 健太郎 (正員: シニア会員)

平 6 名工大・工・電気情報卒。平 8 同大学院修士課程了。同年日本電信電話株式会社入社。以来、主として移動通信基地局用アダプティブアンテナ、MIMO ハードウェア構成及び屋外・屋内測定評価技術、コグニティブ無線における干渉回避技術に関する研究に従事。平 18 デンマーク国オールボー大客員研究員。平 21 新潟大・工・准教授。博士(工学)。平 12 年度本会学術奨励賞、平 14 IEEE AP-S Japan Chapter Young Engineer Award, 平 20 本会ソフトウェア無線研究会最優秀論文賞、平 22 年度本会論文賞各受賞。IEEE 会員。