

3章 マルチユーザMIMOの通信効率とその改善手法

西森 健太郎[†], 正会員 平 栗 健 史^{††}

キーワード: マルチユーザMIMO, Block Diagonalization法, CSIフィードバック, インプリシットビームフォーミング

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、さまざま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世代移动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) やIEEE802.11n 準拠の無線LANでは伝送速度が100 Mbps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¹⁾。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(アンテナ数, 信号処理量)を増大させずにMIMO通信を行う観点から、基地局に多くのアンテナを有し、複数の端末と基地局との伝搬チャネル(Channel State Information: CSI)^{*1}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²⁾が検討されている。MU-MIMO技術は、最新の無線LANおよ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、現在もっともホットな技術の一つであると考えられる。本稿では、MU-MIMO通信と通常の単一ユーザのMIMO通信と区別するため、通常のMIMO通信をシングルユーザMIMO (SU-MIMO) と呼ぶ。

*1 伝搬チャネル情報: 基地局と端末の間でどのように電波が伝搬しているかを示す情報をさし、一般に、Channel State Information (CSI) と呼ばれることが多い。通常は、基地局と端末の間であらかじめ既知の信号を受受信し、その情報から伝搬チャネル情報を得ることができる。

[†] 新潟大学

^{††} 日本工業大学

"Transmission Efficiency and its Countermeasure for Multi-user MIMO" by Kentaro Nishimori (Niigata University, Niigata) and Takefumi Hiraguri (Nippon Institute of Technology, Saitama)

SU-MIMOおよびMU-MIMOの検討では、これまで主に送信側の指向性制御および受信側の復号技術がフォーカスされてきた²⁾。すなわち、物理層 (Physical Layer: PHY) における検討が多く行われてきた。しかしながら、SU/MU-MIMOでは、送受の間の伝搬特性を表す伝搬チャネル行列を利用することが大前提となるため、この情報取得のための効率を考慮することが実際には必要となる。すなわち、PHYレベルだけではなく、Medium Access Control (MAC) 層まで考慮した評価が必要不可欠である。本報告では、無線LANの最新規格であるIEEE802.11acを例にとり、SU/MU-MIMOの下り回線における通信効率をできるだけ厳密に評価することで、MIMO通信の総合性能を定量評価することを目的とする。

本稿では、まずMIMO通信の基本的な考え方として、送信指向性制御あり/なしのSU-MIMOの原理について述べる。次に、MU-MIMOにおける送信指向性制御の必要性とその原理について説明する。次に、MU-MIMO実現のために必要なCSIを取得するための方法について述べる。特に、送信指向性制御を用いる場合、端末から基地局にCSIをフィードバックすることが一般的には必要とされ、それによる通信効率が著しく低下することを示す。また、この改善手法として、CSIフィードバックの削減手法³⁾およびCSIフィードバックを不要にする手法(インプリシットビームフォーミング^{*2)}⁴⁾を紹介する。最後に、CSIのフィードバックのあり/なしにおけるMAC効率を考慮したMU-MIMOのスループットを比較し、インプリシットビームフォーミングの効果と適用領域を明らかにする。

以下、本稿の構成を述べる。2節では、SU/MU-MIMOの基本原理解について説明する。CSIフィードバックの問題点とその改善手法を3節で述べる。4節では、CSIフィードバックのあり/なしに対するMU-MIMOのスループットをIEEE802.11acの信号規格を用いて比較する。

*2 インプリシットビームフォーミング: 送受の周波数が同一であるTime Division Duplex (TDD) であることを利用して、端末から基地局にCSI用の制御信号を送信し、CSIを基地局が推定する。本手法により、CSIフィードバックを排除して指向性制御を実現できる。これに対し、CSIを端末から基地局にフィードバックして指向性制御を実現する場合をエクスプリシットビームフォーミングと呼ぶ。

2. SU/MU-MIMOの基本原理

図1に下り回線におけるSU-MIMOとMU-MIMOの構成を比較した図を示す。図1において、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 $N_U=1$ (SU-MIMO), $N_U=2$ (MU-MIMO) 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形成される。 $N_U=2$ の場合、図1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。

$$\mathbf{s}(t) = \begin{bmatrix} (s^{(1)}(t))^T & (s^{(2)}(t))^T \end{bmatrix}^T, \quad (1)$$

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} (\mathbf{H}^{(1)})^T & (\mathbf{H}^{(2)})^T \end{bmatrix}^T, \quad (2)$$

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} \mathbf{W}^{(1)} & \mathbf{W}^{(2)} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

なお、上添え字の T は行列およびベクトルの転置を表す。また、上添え字の(1), (2)はそれぞれユーザ1, 2の違いを表す。なお、SU-MIMOの場合はユーザの区別が不要であるため、この記号は省略する。

まず、SU-MIMOにおける送信指向性制御あり/なしの違いについて述べる。まず、アンテナ単位で異なるデータをそれぞれ送信する空間分割多重 (Spatial Division Duplex:

SDM) では、これらの信号が端末側で合成されて受信されるため、受信側で信号分離技術が必要となる。受信側の信号分離技術については、これまで多くの研究が行われている¹⁾。

SDMの中で最も簡易な方法としては、Zero Forcing (ZF) が知られている。しかし、ZFはアンテナ間のCSIの相関が高くなると性能が大幅に劣化することが知られている¹⁾。その問題が解決する手段として、Maximum Likelihood Detection (MLD) が検討されている¹⁾。しかし、MLDではアンテナ数の増加と使用する変調方式の多値化に伴い大幅に信号処理量が増加するといった問題がある。そこで、送信側で指向性制御を行うことで性能を改善する手法として、固有モード伝送が提案されている⁵⁾。伝搬チャネル行列 \mathbf{H} は、特異値分解 (Singular Value Decomposition: SVD) を用いると、

$$\mathbf{H} = \mathbf{U} \mathbf{\Lambda} \mathbf{V}^H \quad (4)$$

と書き表わせる。ここで、 \mathbf{H} のランクが M であるとする、 \mathbf{U} , \mathbf{V} はそれぞれ $N_R \times M$, $N_T \times M$ のユニタリ行列になる。 $\mathbf{\Lambda}$ は対角項が特異値となる対角行列であり、この行列の対角成分の2乗が固有値、 $\lambda_i (i=1 \sim L, L = \min(N_T, N_R))$ である。固有モード伝送は、 \mathbf{V} , \mathbf{U}^H をそれぞれ送信および受信ウェイトとして用いることで実現される。また、固有モード伝送は、SU-MIMO通信における最適送受信方法であることも知られている。一方、送信側の伝搬チャネル行列が既知であることを前提とする。すなわち、CSIの端末から基地局へのフィードバックを必要とする。この点に関しては次節で詳細に説明する。

次にMU-MIMOの原理について述べる。MU-MIMOでは、図1に示す $\mathbf{H}^{(1)}$, $\mathbf{H}^{(2)}$ をユーザ2, 1がそれぞれ得ることはできない。これは、 $\mathbf{H}^{(1)}$, $\mathbf{H}^{(2)}$ をユーザ2, 1で共有することが難しいためである。この代わりにあらかじめ基地局側でユーザ1と2あての信号が、それぞれユーザ1, 2のみに届くように指向性制御を行う。1のSU-MIMOにおける固有モード伝送では、伝搬チャネル行列 \mathbf{H} を送信側（基地局側）が推定することで、アンテナ毎ではなく異なる指向性毎に送信信号を送ることができる。MU-MIMOでも伝搬チャネル行列 $\mathbf{H}^{(1)}$, $\mathbf{H}^{(2)}$ を基地局は推定できることを利用する。具体的には、伝搬チャネル行列 $\mathbf{H}^{(1)}$, $\mathbf{H}^{(2)}$ を用いてユーザ間の送信信号の分離を実現する。すなわち、ユーザ1, 2に送信した信号はユーザ2, 1には届かないようにする。この条件下で、基地局とユーザ1, 2の記号は省略する。ユーザ2とのSU-MIMOによる通信を実現することが、下り回線のMU-MIMOでは求められる。ただし、MU-MIMOでもユーザ数分のCSIフィードバックを必要とする。この点に関しても次節で詳細に説明する。

MU-MIMOの送信指向性制御技術として、ブロック対角化法 (Block Diagonalization: BD) が広く知られている⁶⁾。図2に、BD法により形成される空間チャネル (ユーザ1) を示す。図2に示すように、BD法は、

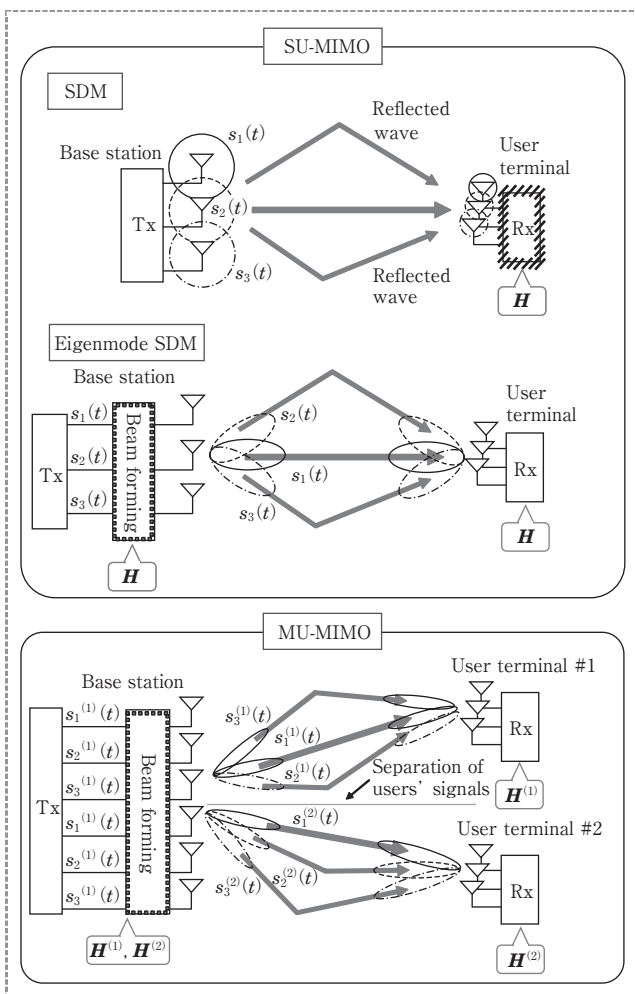
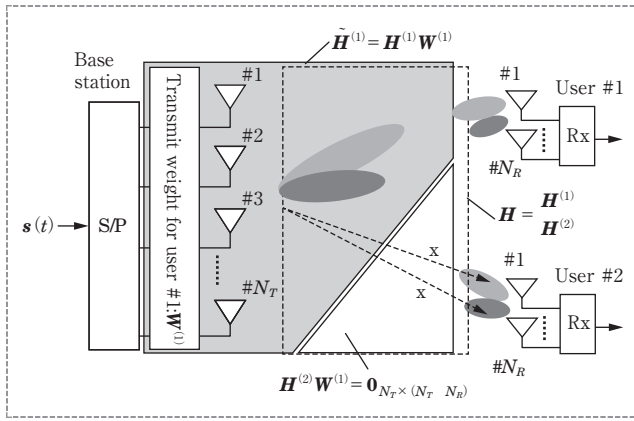


図1 下り回線におけるSU-MIMOとMU-MIMOの比較

図2 BD法により形成される空間チャンネル ($N_U = 2$)

$$\mathbf{H}\mathbf{W} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}^{(1)}\mathbf{W}^{(1)} & \mathbf{0}_{N_R \times (N_T - N_R)} \\ \mathbf{0}_{N_R \times (N_T - N_R)} & \mathbf{H}^{(2)}\mathbf{W}^{(2)} \end{bmatrix} \quad (5)$$

となるようにウエイト \mathbf{W} を決定する。また、式 (5) からわかるように、伝搬チャネル行列 \mathbf{H} がウエイト \mathbf{W} の乗算によりブロック対角化されていることがわかる。これが、本手法がBD法とよばれる理由である⁶⁾。

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⁶⁾。これらの行列は、

$$\mathbf{H}^{(1)}\mathbf{V}_n^{(1)} = \mathbf{H}^{(2)}\mathbf{V}_n^{(1)} = \mathbf{0}_{N_R \times (N_T - N_R)} \quad (6)$$

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2は、 $\mathbf{W}^{(1)}$ によるユーザ1に形成される伝搬チャ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ことがわかる。

3. CSIフィードバックの問題点とその改善手法

3.1 CSIの推定方法

図3にCSIの推定方法を示す。図3に示すようにCSIは端末で推定する場合（方法1）と基地局で推定する場合（方法2）が存在する。方法1では、まず、CSI推定用の制御信号を基地局から端末に送信し、端末側でCSIを推定する。推定されたCSIを端末から基地局に返信する。これをCSIフィードバックと呼ぶ。CSIが基地局に通知されたのち、BD法などの指向性制御法を用いて通信が開始される。

方法2は送受のCSIがまったく同じと仮定、すなわち送信と受信の周波数が同じとなるTime Division Duplex (TDD) で有効となるが、基地局がCSIを推定するため、CSIフィードバックは不要となる。詳細は3.2項で解説する。

3.2 CSIフィードバックの問題点

図4にCSIフィードバックを考慮したMU-MIMOのフ

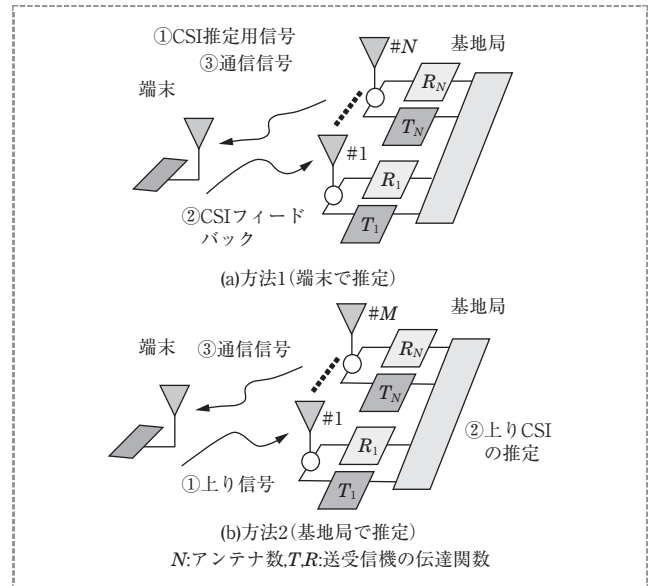


図3 CSIの推定方法

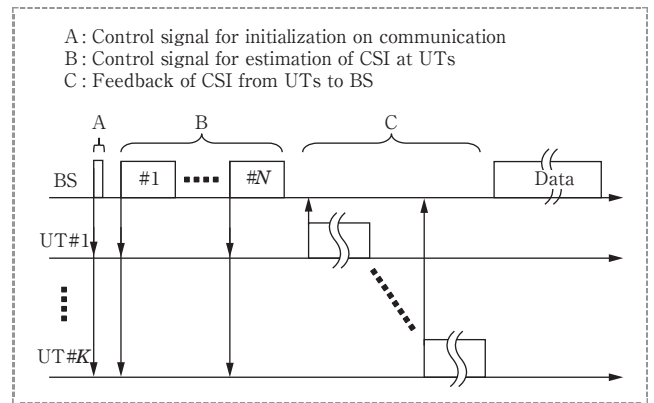


図4 CSIフィードバックを考慮したMU-MIMOのフレーム構成

レーム構成の例を示す。図4において、基地局アンテナ数と端末局の数（ユーザ数）をそれぞれ N_T , N_U とする。簡単化のために、端末毎のアンテナ数 (N_R) は1とする。まず、MU-MIMOでは通信を開始する前に、通信端末を確定させるための制御信号を送信する（図4の時間A）。基地局がCSIを取得するために、基地局のアンテナ1～ N_T から、時分割で1～ N_U 番目の端末に制御信号を送信する（図4の時間B）。各端末はこの情報を用いてCSIを推定し、CSIを基地局にフィードバックする（図4の時間C）。MU-MIMOにおいて基地局アンテナ数を増加させる場合（Massive MIMO^{4)~8)}）やユーザスケジューリング⁹⁾）のために、ユーザ数が増加すると、CSIのフィードバック量は膨大となる。文献4)の結果によれば、基地局アンテナ数を64とすると、IEEE802.11ac規格におけるオーバーヘッド量を算出すると、その値は数十msになることが報告されている。無線LANの1回のパケット伝送を数ms内で収めることを鑑みると、これは伝送速度向上のための大きな足かせになるだけでなく、制御信号の長さとしてはもはや現実的とはいえない。

3.3 伝送効率改善手法

前項で述べたように、CSIフィードバックはSU/MU-MIMOにおける伝送効率を低下させる要因となるため、この情報量を削減する手法が検討されている³⁾。もっともシンプルな方法として、複数のウェイトの候補をあらかじめ用意する手法で、これはコードブックと呼ばれる³⁾。コードブックは、CSIフィードバックの量を削減するのではなく、あらかじめ複数のウェイトの候補を用意しておき、受信側で推定した伝搬チャネル行列から最も適切なコードブックを選択し、そのインデックス番号をフィードバックする。コードブックを選択する手法はLTEで標準化されている³⁾。

CSIフィードバックを圧縮する手法として、受信側で取得した伝搬チャネル行列を時間領域に変換し、この情報からCSIフィードバックを行う方法が提案されている¹⁰⁾。本手法の概念図を図5に示す。現在の高速伝送を実現するシステムではOFDMが採用されており、OFDMを用いる場合は、サブキャリア毎にCSIが推定される。周波数軸で推定されたCSIをInversed FFT (IFFT) を用いて時間軸への情報に変換する。これにより得られた情報はCSIの遅延プロファイルに相当し、遅延時間が長くなるとその成分の電力は小さい。そこで電力の高い時間成分のみをフィードバックすることで、CSIのフィードバック量を周波数軸の場合のそれよりも大きく削減することができる。なお、IFFTはOFDMを用いる装置には使用されており、そのまま流用することができる利点もある¹⁰⁾。

もう一つの伝送効率改善手法として、図3に示すように、端末側からの制御信号を基地局が受信し、その情報でCSIを推定するインプリシットビームフォーミングと呼ばれる

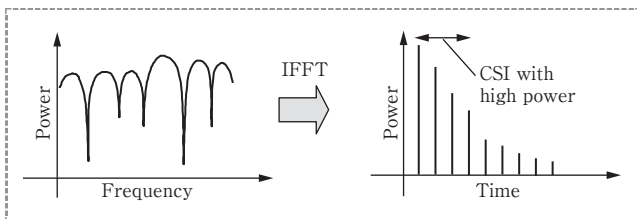


図5 CSI圧縮のための周波数領域から時間領域への変換

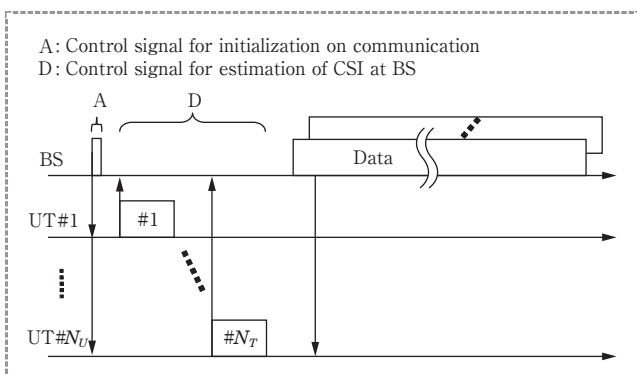


図6 インプリシットビームフォーミングによるMUMIMOのフレーム構成

手法が提案されている⁴⁾。そのフレーム構成を図6に示す。この考えは、TDDシステムで有効であり、送受の伝搬チャネル応答の可逆性を利用するものである。具体的には、基地局の装置内の送受信機の伝達関数の差を補正するキャリブレーション技術で解決できる^{4)~8)}。この方法のもっとも重要な特徴は、図4の大部分を占める時間Cを完全になくすることができる。これにより、Massive MIMOにおいて大幅に伝送効率を向上できることが報告されている⁴⁾。また、この手法はユーザスケジューリングを適用する環境でも有益となる。

4. インプリシットビームフォーミングによるMU-MIMOのスループット特性改善効果

4.1 計算条件

本節では、インプリシットビームフォーミングによるMU-MIMOのスループット特性の改善効果を定量的に評価する。信号はIEEE802.11acの信号に準拠した方法で評価を行った。表1に主要な計算条件を示す。送信アンテナ数(N_T)は、4, 8, 16, 64とした。また、受信素子数(N_R)は1、ユーザ数(N_U)は4とした。すなわち、ユーザあたりの送信データ数は1となる。MU-MIMOにおいて送信アンテナ数が受信アンテナ数×ユーザ数よりも多くなると、ビームフォーミングゲインによりPHYにおける伝送速度が大きく向上し、サービスエリアを増大することができる。しかし、アンテナ数の増大はCSI取得数の増大にもつながる。特にCSIフィードバックを適用する場合は、通信効率の低下につながる事が予想される。本検討では、表1に示すIEEE802.11acで規定されるパラメータを用いて、MACレベルでのスループットを評価した。

本報告ではCSI取得などの制御信号を考慮した通信効率を厳密に行うことを目的とし、伝搬環境としてはMU-MIMO通信にとって理想的な環境であるindependent and identically-distributed (i.i.d.) レイレーフェージング環境を

表1 計算条件

| | |
|---------------------------------------|--|
| Number of Transmit Antennas (N_T) | 4, 8, 16, 64 |
| Number of Receive Antennas (N_R) | 1 |
| Number of Users (N_U) | 4 |
| Frequency (f_c) | 5,200 MHz |
| Bandwidth | 40 MHz |
| Transmit Distance (d) | 1~50 m |
| Path loss (L) | $31 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f_c) - 28$ |
| Transmit Power | 19 dBm |
| Antenna Gain | 2 dBi |
| NPDA (Null Data Packet Announcement) | 64~76 μ s |
| NDP (Null Data Packet) | 52 ($N_T=4$), 292 ($N_T=64$) μ s |
| NDP (for Implicit Beamforming) | 40 μ s |
| BR (Beamforming Report) | 62 ($N_T=4$), 450 ($N_T=64$) μ s |
| BA (Beamforming ACK) | 44 μ s |
| BAR (Beamforming ACK Request) | 44 μ s |
| Frame Aggregation | 5,000~40,000 Byte |

表2 IEEE802.11acにおける変調方式と伝送レート (TR) の関係 (40 MHzモード)

| Modulation | Rate | Rmin | TR [Mbps] | SNR [dB] |
|------------|------|------|-----------|----------|
| BPSK | 1/2 | -79 | 15 | 6 |
| QPSK | 1/2 | -76 | 30 | 9 |
| QPSK | 3/4 | -74 | 45 | 11 |
| 16-QAM | 1/2 | -71 | 60 | 14 |
| 16-QAM | 3/4 | -67 | 90 | 18 |
| 64-QAM | 2/3 | -63 | 120 | 22 |
| 64-QAM | 3/4 | -62 | 135 | 23 |
| 64-QAM | 5/6 | -61 | 150 | 24 |
| 256-QAM | 3/4 | -56 | 180 | 29 |
| 256-QAM | 5/6 | -54 | 200 | 31 |

採用した。ここで、i.i.d.とはMIMOのチャネル行列を考える場合に、各要素が独立したレイリーフェージング環境であることを意味する。一方、送信指向性制御はサービスエリア端でその効果が向上することから、屋内モデルとして提案されているITU-Rの伝搬損失モデルを採用した¹¹⁾。周波数は5.2 GHzとし、送受信距離に対する伝搬損失係数は3.1とした。サービスエリアは1～50 mまでを考慮した。MU-MIMOの指向性制御にはBD法を用いた。

IEEE802.11acで使用される変調方式から算出される伝送レートを表2に示す。BD法では、固有値(λ_{BD})より変調方式が決定される。具体的には、伝搬チャネル行列を変化させる各試行ごとに、 $\lambda_{BD}/(N_T \sigma^2)$ を計算し、これらの値が表2に示すSNRよりも高くなる場合、該当する変調方式が利用できるとした。ここで、 σ^2 は熱雑音電力である。なお、表2において、実際に該当する変調方式をIEEE802.11ac規格で伝送したとき、BERが 10^{-7} 以下になる場合のSNRを表している。

4.2 インプリシットビームフォーミングの効果

図7に、基地局と端末の送受信距離に対するPHYレベルでの伝送レート特性を示す。ここで、PHYレベルとは、使用する変調方式と符号化率および信号帯域のみで伝送レートが決定されることを意味する。これに対し、MACを考慮した場合は、CSIフィードバックに必要な制御信号などが付加される。図から明らかなように、送信アンテナ数(N_T)を増加させることにより、同一の送受信距離では伝送レートが、同一の伝送レートではより長い送受信距離で通信が実現できることが確認できる。この計算では、トータルのデータ数が4であるため、 N_T を4から8に増加させる効果は大きい、それ以上増加させると効果は徐々に少なくなることも確認できる。例えば、送受信距離が15 mの場合、 N_T を4から8、16に増加させることで伝送レートをそれぞれ2、2.5倍にすることができる。サービスエリアを増大させる効果としては、 $N_T=4$ の場合、送受信距離が35 mまでしか通信できないのに対し、 N_T を増加すれば50 mでも十分に通信でき、これに関しては、素子数が増加すればするほど効果が大きくなることを確認できる。

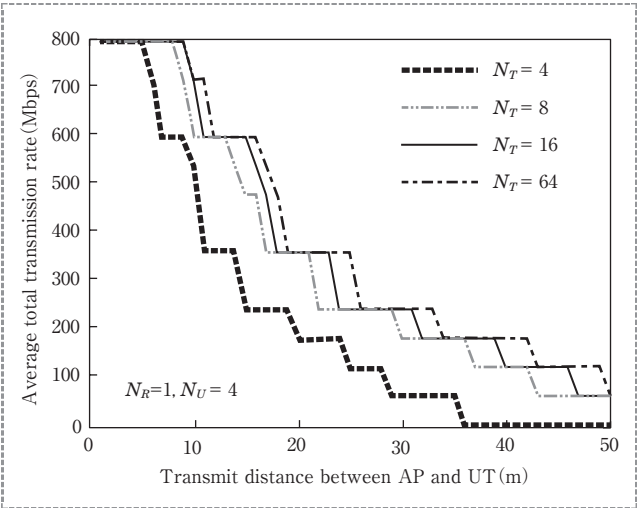


図7 送受信距離に対するPHYレベルでの伝送レート特性

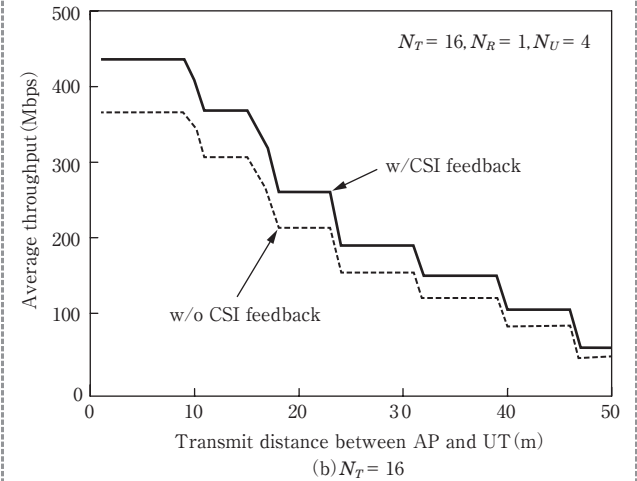
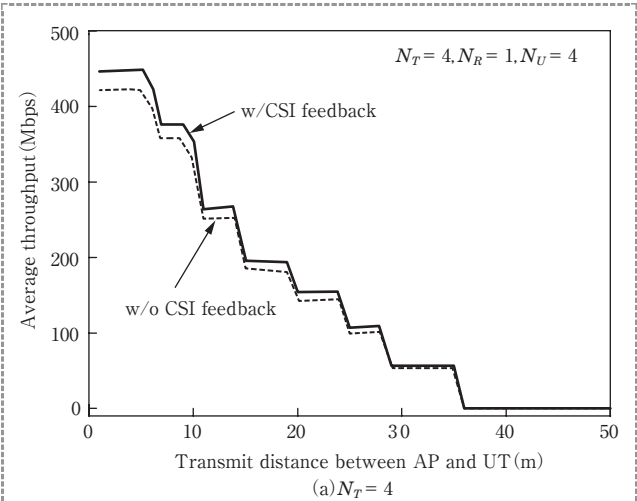


図8 送受信距離に対するスループット特性

先の結果により、MU-MIMOにおける送信指向性制御の効果が示された。次に、送信アンテナ数の違いによるCSIの影響を考慮したスループット特性を図8に示す。データサイズは37,500 byteとしている。ここでは、CSIフィードバックを考慮した場合と考慮しないインプリシットビーム

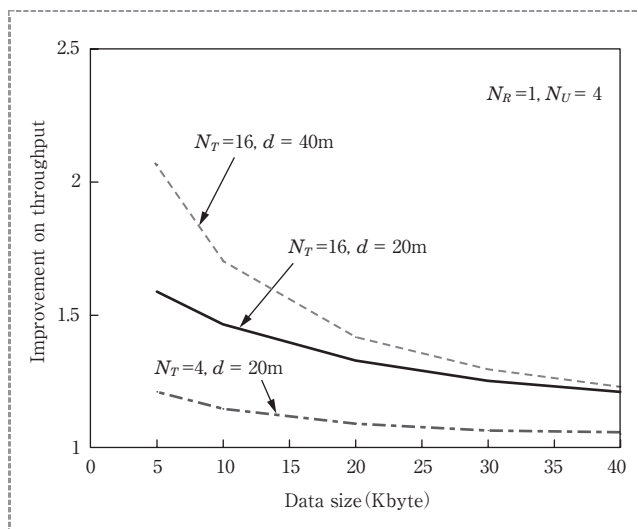


図9 データサイズに対するインプリシットビームフォーミングのスループット改善

フォーミングの場合の特性を比較している。CSIフィードバックを考慮すると、 N_T を増加させてもスループット特性が大きく向上しないことがわかる。一方、CSIフィードバックを用いないインプリシットビームフォーミングを適用すると、スループットはアンテナ数が多くなると大幅に向上することが確認できる。 N_T が4 (図8(a)), 16 (図8(b)) の場合、送受信距離を15mとした場合、それぞれ11 (図8(a)), 62Mbps (図8(b)) のスループット改善効果が得られることが確認できた。

最後にデータサイズを変化させた場合のインプリシットビームフォーミングによりスループット改善効果を図9に示す。まず、送受信距離 d が20mの場合を見ると、 $N_T=4$ のは、データサイズが小さくてもCSIフィードバックをなくす効果は小さく、その改善は1.2倍程度にとどまっている。一方、 $N_T=16$ の場合は、データサイズが5,000byteでは1.5倍のスループット改善効果を得る。さらに、 $N_T=16$ の場合は、送受信距離 $d=40$ mの場合に最大で2倍以上のスループット改善効果を得ることができる。これらの結果から、データサイズが小さく、かつ送信アンテナ数が多い環境でインプリシットビームフォーミングの効果が大きくなることを明らかにした。

5. むすび

本稿では、MU-MIMO伝送におけるCSIフィードバックに関する伝送効率をスループット特性により評価した。まずMIMO伝送の基本的な考え方として、送信指向性制御あり/なしのSU-MIMO伝送について述べた。次に、MU-MIMOにおける送信指向性制御の必要性とその原理について解説した。次に、MU-MIMO実現のために必要なCSIを取得するための方法について述べ、端末から基地局にCSIをフィードバックすると通信効率が著しく低下することを示した。ま

た、CSIフィードバックを不要にする方法として、CSIフィードバックの圧縮とCSIフィードバックをなくすインプリシットビームフォーミングを紹介した。最後に、CSIのフィードバックのあり/なしにおけるIEEE802.11acベースのMAC効率を考慮したMU-MIMOのスループットを比較した。その結果、CSIフィードバックをなくすインプリシットビームフォーミングは、CSIフィードバックありの場合に比べて、送信素子数16、ユーザ数が4の環境で最大2倍以上のスループットの改善効果を得ることを明らかにした。

謝辞 本研究の一部は、平成26年度放送文化基金の研究助成および科研費(基盤研究(C)25420362)の助成により行われたものである。

(2015年9月30日受付)

〔文 献〕

- 1) 大鐘, 小川: “わかりやすいMIMOシステム技術”, オーム社 (2009)
- 2) 西森: “マルチユーザMIMOの基礎”, コロナ社 (2014)
- 3) 畑川, 伏木, 松本, 小西: “マルチユーザMIMOにおけるCSIフィードバックとプリコーディング”, 信学誌, 97, 4, pp.290-296 (Apr. 2014)
- 4) T. Murakami, H. Fukuzono, Y. Takatori and M. Mizoguchi: "Multiuser MIMO with implicit channel feedback in massive antenna systems", IEICE Communications Express, 2, 8, pp.336-342 (Aug. 2013)
- 5) J.B. Andersen: "Array gain and capacity for known random channels with multiple element arrays at both ends", IEEE J. Sel. Areas Commun., 18, 11, pp.2172-2178 (Nov. 2000)
- 6) Q.H. Spencer, A.L. Swindlehurst and M. Haardt: "Zero forcing methods for downlink spatial multiplexing in multiuser MIMO channels", IEEE Trans. Sig. Processing, 52, 2, pp.461-471 (Feb. 2004)
- 7) 福園, 村上, 工藤, 鷹取, 溝口: “下りマルチユーザMIMO OFDMシステムにおけるインプリシットフィードバックの実験評価”, 信学技報, RCS2013-187
- 8) 西森, 山田: “CSIフィードバックを不要とするキャリブレーション回路によるMassive MIMO伝送の基本特性”, 信学技報A・P2013-181 (Feb. 2014)
- 9) Z. Shen, R. Chen, J.G. Andrews, R.W. Heath, Jr. and B.L. Evans: "Low complexity user selection algorithm for multiuser MIMO systems with block diagonalization", IEEE Trans. Signal Process., 54, 9 (Sep. 2006)
- 10) Y. Hatakeyama, T. Mastumoto and S. Konishi: "Development and experiment of linear and non-linear pre-coding on a real-time multiuser-MIMO testbed with limited CSI feedback", Proc. In IEEE PIMRC 2013, pp.1606-1611 (Sep. 2012)
- 11) Rec. ITU-R P. 1238-4, P Series (2005)



西森健太郎 1994年, 名工大・工・電気情報卒業。1996年, 同大学大学院修士課程修了。同年, 日本電信電話(株)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ハードウェア構成および屋外・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。2006年, デンマーク国オールボー大学客員研究員。2009年, 新潟大学工学部准教授。2000年, 当会学術奨励賞, 2002年, IEEE AP-S Japan Chapter Young Engineer Award等受賞。博士(工学)。



平栗 健史 1999年, 筑波大学大学院修士課程修了。同年, 日本電信電話(株)入社。以来, 主として高速無線通信および通信品質のアクセス制御方式に関する研究開発に従事。2010年, 日本工業大学工学部准教授。2011年, NHK技術研究所客員研究員。博士(情報学)。正会員。