

分散アンテナ協調伝送におけるマルチユーザスケジューリング時の MMSE-SVD と BD-SVD の下りリンク容量比較

関 裕太[‡] 安達 文幸[†]

東北大学 電気通信研究機構 〒980-8577 宮城県仙台市青葉区片平2丁目1-1
E-mail: [‡]seki.yuta@riec.tohoku.ac.jp, [†]adachi@ecei.tohoku.ac.jp

あらまし マクロセル内に多数のアンテナを分散配置し、ユーザ端末近傍の複数の分散アンテナを用いて協調伝送(Cooperative distributed antenna transmission (CDAT))を行うことで、マクロセル内全体で高いリンク容量を達成できる。筆者らは最近、下りリンクマルチユーザマルチアンテナ送受信(MU-MIMO)において、最小平均二乗誤差(MMSE)フィルタリングと特異値分解(SVD)を組み合わせた規範に基づく MMSE-SVD を提案し、ブロック対角化と SVD を用いる BD-SVD より低演算量でありながら高いリンク容量を実現できることを明らかにした。ところで、マルチユーザスケジューリング適用時のリンク容量は、空間多重するユーザの組み合わせに依存する。本報告では、MMSE-SVD および BD-SVD を対象に、3つのマルチユーザスケジューリング規範(Max-SNR, Proportional Fair (PF), Round Robin (RR))適用時の直交周波数分割多重(OFDM)下りリンク容量を計算機シミュレーションにより求め、MMSE-SVD が BD-SVD と比較して高いリンク容量および公平性を実現できることを明らかにしている。また、CDAT では、簡易なスケジューリング処理である RR を用いても高い合計リンク容量と公平性を期待できることを示した。

キーワード 分散アンテナ, 下りリンク, OFDM, MU-MIMO, マルチユーザスケジューリング

Downlink Capacity Comparison of MMSE-SVD and BD-SVD for Cooperative Distributed Antenna Transmission using Multi-user Scheduling

Yuta SEKI[‡] Fumiyuki ADACHI[†]

Research Organization of Electrical Communication, Tohoku University
2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai, Miyagi, 980-8577, Japan
E-mail: [‡]seki.yuta@riec.tohoku.ac.jp, [†]adachi@ecei.tohoku.ac.jp

Abstract Cooperative distributed antennas transmission (CDAT) is a promising transmission technique to achieve a high link capacity by exploiting the spatial distribution of antennas over a macro-cell area. Recently, we proposed a minimum mean square error filtering combined with singular value decomposition (MMSE-SVD) for multi-user spatial multiplexing and showed that it can achieve higher sum capacity with lower computational complexity than BD-SVD which applies SVD after block diagonalization (BD). When using multi-user scheduling, the link capacity of MU-MIMO is affected by the combination of user equipments (UEs) chosen for spatial multiplexing. In this paper, we evaluate by computer simulation the OFDM downlink capacities achievable by MMSE-SVD and BD-SVD. Three types of multi-user scheduling (Round Robin (RR), Proportional Fair (PF), Max-SNR) are considered. We show that MMSE-SVD can achieve higher link capacity with higher fairness than BD-SVD. And we show that, in CDAT, RR scheduler can provide high link capacity and fairness with simple operation.

Keyword Distributed antenna, downlink, OFDM, MU-MIMO, multi-user scheduling

1. まえがき

第5世代移動通信システム(5G)では、第4世代移動通信システム(4G)からの更なる性能向上として、通信リンク容量向上、広帯域化、低遅延化、接続デバイスの増加、低消費電力化等が求められている[1]。広帯域無線チャネルは伝搬損失、シャドウイング損失および周波数選択性フェージングにより伝送品質が著しく劣

化する[2]。これら課題を克服するために、筆者らは、マクロセル内に多数の分散アンテナを配置し、マクロ基地局(MBS)で複数の分散アンテナを用いる協調伝送(Cooperative distributed antenna transmission (CDAT))の検討を行っている[3,4]。CDATでは、ユーザ端末(UE)近傍の分散アンテナを用いることにより、伝搬損失、シャドウイング損失の影響を軽減でき、リンク容量の大幅な向上が期待できる。また、CDATにマルチユーザマ

ルチアンテナ送受信(MU-MIMO)伝送[5]を適用すれば、更に高いリンク容量を達成できる[6,7].

直交周波数分割多重(OFDM)下りリンクへ MU-MIMO を適用したとき、各 UE 内のアンテナ間で生じる干渉(IAI), 同時通信する UE 間で生じる干渉(IUI)によって通信品質が劣化する. MBS において IAI, IUI を生じないように MIMO チャンネルを直交化する Zero-forcing (ZF)[8]が知られているが、送信機側のみの処理のため空間分離には限界がある[8], [12]. 伝送品質改善のために、非線形演算処理である Tomlinson-Harashima Precoding(THP)[9] や Vector Perturbation (VP)[10]が検討されているが、演算量が許容できないほど膨大なものになってしまう. ところで、MBS において IUI の除去を狙ったブロック対角化(BD)を行い等価的なシングルユーザ MIMO チャンネルに変換したうえで、IAI の除去を狙った特異値分解(SVD)を用いる固有モード伝送を行う BD-SVD が提案されている[11]. 筆者らは最近、各 UE が SVD を用いる固有モード受信を行うことを仮定し、MBS において最小平均二乗誤差(MMSE)フィルタリングを行う MMSE-SVD[12]を提案し、BD-SVD 比較して低演算量でありながら高い合計リンク容量を達成できることを示した[13].

ところで、一般に MU-MIMO では同時に通信を行う UE が互いに影響するため、多重する UE の合計リンク容量は UE の組み合わせに依存する. そこで本稿では、OFDM 下りリンク CDAT における MMSE-SVD および BD-SVD を対象に、3 つのマルチユーザスケジューリング規範(Max-SNR, Proportional Fair (PF), Round Robin (RR))[14]適用時の合計リンク容量および Jain の公平性[15]を計算機シミュレーションにより求め、マルチユーザスケジューリング適用時においても MMSE-SVD が BD-SVD と比較して高い合計リンク容量および公正性を実現できることを明らかにする.

本報告の構成は以下のとおりである. 第 2 章では OFDM 下りリンクにおける分散アンテナ協調伝送について述べ、BD-SVD および MMSE-SVD について説明する. 第 3 章では 3 つのマルチユーザスケジューリング規範を説明する. 第 4 章では本報告で仮定するネットワークモデル、および計算機シミュレーション結果を示し、第 5 章でまとめる.

表記法: $E[\cdot]$, $[\cdot]^T$ および $[\cdot]^H$ はそれぞれアンサンブル平均、行列の転置およびエルミート転置を表す. $\delta(x)$ はデルタ関数、 \mathbf{I}_N は $N \times N$ の単位行列を表す.

2. OFDM 下りリンクにおける分散アンテナ協調伝送

2.1. 送受信信号表現

OFDM 下りリンクにおける分散アンテナ協調伝送系を図 1 に示す N_{ue} 本のアンテナを有する U 台の UE との MU-MIMO 伝送を考える. MBS は $N_{\text{mbs}} (\geq U \cdot N_{\text{ue}})$ 本の分散アンテナを用いると仮定する. MBS では、第 u 番目 UE の情報ビット系列を直並列(S/P)変換した後、各系列をデータ変調し $N_{\text{strm}} (\leq N_{\text{ue}})$ 個のデータシンボ

ル系列に変換する. 各データシンボル系列を N_c 個 ($k=0 \sim N_c-1$) のデータシンボルからなるブロックに分割し、 $N_{\text{strm}} \times 1$ の送信データシンボルベクトル $\mathbf{D}_u(k) = [d_{u,0}(k), \dots, d_{u,n_{\text{strm}}}(k), \dots, d_{u,N_{\text{strm}}-1}(k)]^T$ を得る. U 台の UE 分の $\mathbf{D}_u(k)$ を並べたベクトル $\mathbf{D}(k)$ に対し送信フィルタリングを行い、次式で表される $N_{\text{mbs}} \times 1$ の送信シンボルベクトル $\mathbf{S}(k)$ を得る.

$$\begin{aligned} \mathbf{S}(k) &= \sqrt{\frac{2E_s}{T_s}} \mathbf{W}_{\text{mbs}}(k) \mathbf{D}(k) \\ &= \sqrt{\frac{2E_s}{T_s}} \mathbf{W}_{\text{mbs}}(k) \begin{bmatrix} \mathbf{D}_0(k) \\ \vdots \\ \mathbf{D}_{U-1}(k) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{W}_{\text{mbs}}(k) = [\mathbf{W}_{\text{mbs},0}(k), \dots, \mathbf{W}_{\text{mbs},u}(k), \dots, \mathbf{W}_{\text{mbs},U-1}(k)]$ は $N_{\text{mbs}} \times U \cdot N_{\text{strm}}$ の送信フィルタ行列である. MMSE-SVD および BD-SVD における送信フィルタ行列は次式で表される.

$$\left\{ \begin{aligned} \mathbf{W}_{\text{mbs}}(k) &= \mathbf{W}_{\text{mmse}}(k) \\ &= [\mathbf{W}_{\text{mmse},0}(k), \dots, \mathbf{W}_{\text{mmse},u}(k), \dots, \mathbf{W}_{\text{mmse},U-1}(k)] \\ &= (\mathbf{U}^H(k) \mathbf{H}(k))^{-1} \\ &\quad \times \left(\mathbf{U}^H(k) \mathbf{H}(k) \right) \left(\mathbf{U}^H(k) \mathbf{H}(k) \right)^H \right\}^{-1} \mathbf{P}_{\text{mmse}}^{1/2}(k) \quad (2) \\ &\quad \text{(for MMSE-SVD)} \\ \mathbf{W}_{\text{mbs},u}(k) &= \mathbf{W}_{\text{bd-svd},u}(k) \\ &= \bar{\mathbf{V}}_u(k) \hat{\mathbf{V}}_u(k) \mathbf{P}_{\text{bd-svd},u}^{1/2}(k) \quad \text{(for BD-SVD)} \end{aligned} \right.$$

ここで、 $\mathbf{H}(k) = [\mathbf{H}_0^T(k), \dots, \mathbf{H}_u^T(k), \dots, \mathbf{H}_{U-1}^T(k)]^T$ は $U \cdot N_{\text{ue}} \times N_{\text{mbs}}$ の下りリンク MU-MIMO チャンネル行列を表す. $\mathbf{U}(k) = \text{diag}[\mathbf{U}_0(k), \dots, \mathbf{U}_u(k), \dots, \mathbf{U}_{U-1}(k)]$ の部分行列 $\mathbf{U}_u(k)$ は $\mathbf{H}_u(k)$ を次式のように SVD することにより得られる.

$$\mathbf{H}_u(k) = \mathbf{U}_u(k) \mathbf{\Lambda}_u^{1/2}(k) \mathbf{V}_u^H(k) \quad (3)$$

ここで、 $\mathbf{U}_u(k)$ および $\mathbf{V}_u(k)$ はそれぞれ $\mathbf{H}_u(k)$ の左特異値および右特異値ベクトルを各列に有するユニタリ行列である. $\mathbf{\Lambda}_u(k)$ は第 n_{strm} 対角要素に $\mathbf{H}_u(k)$ の第 n_{strm} 番目の固有値を有する対角行列である. $\mathbf{U}^H(k) \mathbf{H}(k)$ は、各 UE が固有モード受信しているときの下りリンク等価チャンネル行列を表す. また、 $\bar{\mathbf{V}}_u(k)$ は、 $\mathbf{H}(k)$ をブロック対角化(BD)する重みであり、 $\mathbf{H}(k)$ から第 u 番目 UE に対応するチャンネル $\mathbf{H}_u(k)$ を除いた $(U-1)N_{\text{ue}} \times N_{\text{mbs}}$ のチャンネル行列 $[\mathbf{H}_0^T(k) \cdots \mathbf{H}_{u-1}^T(k), \mathbf{H}_{u+1}^T(k) \cdots \mathbf{H}_{U-1}^T(k)]^T$ を次式のように SVD することで得られる零の特異値に対応する右特異ベクトルからなる行列である.

$$\begin{aligned} &[\mathbf{H}_0^T(k) \cdots \mathbf{H}_{u-1}^T(k), \mathbf{H}_{u+1}^T(k) \cdots \mathbf{H}_{U-1}^T(k)]^T \\ &= \bar{\mathbf{U}}_u(k) \left[\bar{\mathbf{\Lambda}}_u^{1/2}(k), \mathbf{0} \right] \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{V}}_{\text{signal},u}^H(k) \\ \bar{\mathbf{V}}_u^H(k) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4)$$

第 u 番目 UE の BD 後の等価チャンネル行列 $\mathbf{H}_u(k) \bar{\mathbf{V}}_u(k)$ は、IUI が発生しない SU-MIMO チャンネルとみなすこと

ができる． $\hat{\mathbf{V}}_u(k)$ は BD 後の等価チャネル行列 $\mathbf{H}_u(k)\bar{\mathbf{V}}_u(k)$ を次式のように SVD して得られる右特異ベクトルからなる行列である．

$$\mathbf{H}_u(k)\bar{\mathbf{V}}_u(k) = \hat{\mathbf{U}}_u(k)\hat{\mathbf{\Lambda}}_u^{1/2}(k)\hat{\mathbf{V}}_u^H(k) \quad (5)$$

$\mathbf{P}_{\text{mmse}}^{1/2}(k) = \text{diag}[\mathbf{P}_{\text{mmse},0}(k) \cdots \mathbf{P}_{\text{mmse},U-1}(k)]$ の部分行列 $\mathbf{P}_{\text{mmse},u}(k)$ および $\mathbf{P}_{\text{bd-svd},u}^{1/2}(k)$ は，第 u 番目 UE の各固有モード・サブキャリアへの注水定理[16]に基づく電力配分を与える $N_{\text{strm}} \times N_{\text{strm}}$ 対角行列である．

第 u 番目 UE では， N_{ue} 本のアンテナで受信した各受信ブロックから CP を除去し， N_c ポイント DFT を適用して周波数領域受信信号ブロックに変換する． $N_{\text{ue}} \times 1$ の受信信号ベクトル $\mathbf{R}_u(k)$ は次式で表される．

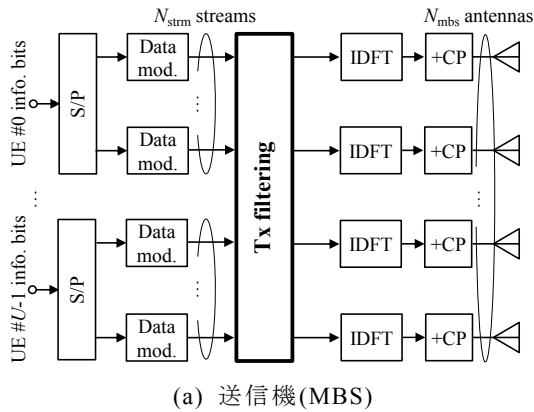
$$\mathbf{R}_u(k) = \mathbf{H}_u(k)\mathbf{S}(k) + \mathbf{N}_u(k) \quad (6)$$

ここで $\mathbf{N}_u(k)$ は $N_{\text{ue}} \times 1$ の雑音+CCI ベクトルであり，各要素が零平均で分散 $2(N_0 + I_0(u))/T_s$ の複素ガウス変数である．下りリンクでは，隣接マクロセルの N_{mbs} 本の分散アンテナから送信される信号が UE への CCI となる．UE に搭載されている N_{ue} 本の受信アンテナはそれらの間隔が2分の1波長程度であるため，各受信アンテナにおける CCI はほぼ同じ強さになると仮定した． $\mathbf{R}_u(k)$ に対し $N_{\text{strm}} \times N_{\text{ue}}$ の受信フィルタ行列 $\mathbf{W}_{\text{ue},u}(k)$ を乗積し， $N_{\text{strm}} \times 1$ の軟判定シンボルベクトル $\hat{\mathbf{D}}_u(k)$ を得る．

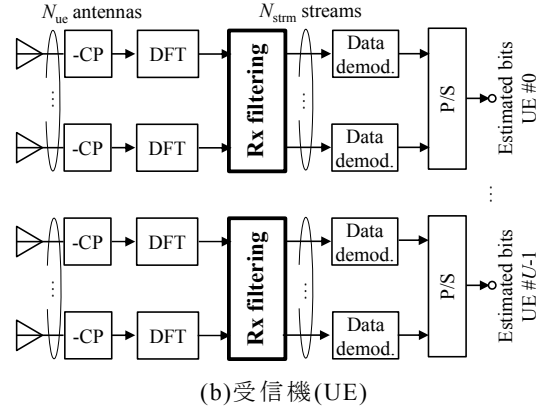
$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{D}}_u(k) &= [\hat{d}_{u,0}(k), \dots, \hat{d}_{u,N_{\text{strm}}-1}(k)]^T \\ &= \mathbf{W}_{\text{ue},u}(k)\mathbf{R}_u(k) \end{aligned} \quad (7)$$

MMSE-SVD および BD-SVD における受信フィルタ行列は次式で表される．

$$\begin{cases} \mathbf{W}_{\text{ue},u}(k) = \mathbf{U}_u^H(k) & (\text{for MMSE-SVD}) \\ \mathbf{W}_{\text{ue},u}(k) = \hat{\mathbf{U}}_u^H(k) & (\text{for BD-SVD}) \end{cases} \quad (8)$$



(a) 送信機(MBS)



(b)受信機(UE)

図1 OFDM 下りリンクにおける分散アンテナ協調伝送系

2.2. リンク容量

本報告では，送受信協調フィルタリング後の受信信号対干渉+雑音電力(SINR)に基づくシャノン容量式によりリンク容量を求める．第 u 番目 UE の下りリンク容量 C_u (bps/Hz) は次式で表される．

$$C_u = \sum_{n_{\text{strm}}=0}^{N_{\text{strm}}-1} \sum_{k=0}^{N_c-1} \log_2(1 + \gamma_u(k; n_{\text{strm}})) \quad (9)$$

ここで， $\gamma_u(k; n_{\text{strm}})$ は送受信協調フィルタリング後の第 u 番目 UE における第 n_{strm} ストリームの第 k サブキャリアにおける受信 SINR であり，次式で表される．

$$\gamma_u(k; n_{\text{strm}}) = \frac{\frac{E_s}{N_0} |\hat{H}_u(k; n_{\text{strm}}, u \cdot N_{\text{strm}} + n_{\text{strm}})|^2}{\mu_u^{\text{IAI}}(k; n_{\text{strm}}) + \mu_u^{\text{IUI}}(k; n_{\text{strm}}) + \mu_u^{\text{noise+CCI}}(k; n_{\text{strm}})} \quad (10)$$

ここで， $\hat{H}_u(k; n_{\text{strm}}, u \cdot N_{\text{strm}} + n_{\text{strm}})$ は次式で表される送受信フィルタリング後の等価チャネルの第 $(n_{\text{strm}}, u \cdot N_{\text{strm}} + n_{\text{strm}})$ 要素である．

$$\hat{\mathbf{H}}_u(k) = \mathbf{W}_{\text{ue},u}(k)\mathbf{H}_u(k)\mathbf{W}_{\text{mbs}}(k) \quad (11)$$

$\mu_u^{\text{IAI}}(k; n_{\text{strm}})$ ， $\mu_u^{\text{IUI}}(k; n_{\text{strm}})$ および $\mu_u^{\text{CCI+noise}}(k; n_{\text{strm}})$ は，それぞれ送受信フィルタリング後の第 u 番目 UE における第 n_{strm} ストリームの第 k サブキャリアにおける IAI, IUI および雑音+CCI 電力であり，次式で表される．

$$\begin{cases} \mu_u^{\text{IAI}}(k; n_{\text{strm}}) = \left(\frac{E_s}{N_0} \right) \sum_{\substack{n'_{\text{strm}}=0 \\ n'_{\text{strm}} \neq n_{\text{strm}}}^{N_{\text{strm}}-1}} \left| \hat{H}_u(k; n_{\text{strm}}, u \cdot N_{\text{strm}} + n'_{\text{strm}}) \right|^2 \\ \mu_u^{\text{IUI}}(k; n_{\text{strm}}) = \left(\frac{E_s}{N_0} \right) \sum_{\substack{u'=0 \\ u' \neq u}}^{U-1} \sum_{n'_{\text{strm}}=0}^{N_{\text{strm}}-1} \left| \hat{H}_u(k; n_{\text{strm}}, u' \cdot N_{\text{strm}} + n'_{\text{strm}}) \right|^2 \\ \mu_u^{\text{noise+CCI}}(k; n_{\text{strm}}) = \left(1 + \frac{I_0(u)}{N_0} \right) \sum_{n_{\text{ue}}=0}^{N_{\text{ue}}-1} \left| W_{\text{ue},u}(k; n_{\text{strm}}, n_{\text{ue}}) \right|^2 \end{cases} \quad (12)$$

ここで， $W_{\text{ue},u}(k; n_{\text{strm}}, n_{\text{ue}})$ は $\mathbf{W}_{\text{ue},u}(k)$ の第 $(n_{\text{strm}}, n_{\text{ue}})$ 要素である．合計リンク容量は U 台の多重 UE のリンク容量の総和である．

3. マルチユーザスケジューリング

本報告では，Max-SNR, Proportional Fair (PF), Round Robin (RR) の3つのスケジューリング規範[14]を検討

している. スケジューラは, 第 t タイムスロットにおいて, マクロセル内に存在する U_{act} 台のアクティブ UE(集合 Y)から U 台の UE を選択し, MU-MIMO 伝送で UE 多重を行う. 第 t タイムスロットにおいて選択した多重 UE の組み合わせを $Y(t)$ と表し, $Y(t) \subset Y, |Y|=U_{\text{act}}, |Y(t)|=U$ の関係がある.

Max-SNR スケジューリング規範では, 各タイムスロットにおける期待リンク容量が最大となる UE の組み合わせを次式に基づき選択する.

$$Y(t) = \arg \max_{Y_U(t) \subset Y} \sum_{u \in Y_U(t)} \hat{C}_u(t, Y_U(t)) \quad (13)$$

ここで, $\hat{C}_u(t, Y_U(t))$ は第 t タイムスロットにおける多重 UE の組み合わせ $Y_U(t)$ ($Y_U(t) \subset Y, |Y_U(t)|=U$) の第 u 番目 UE ($u \in Y_U(t)$) の期待リンク容量 (bps/Hz) である. 本報告では, マルチユーザスケジューリング時に周辺セルの UE 選択結果は未知であると仮定し, 期待リンク容量は周辺セルからの CCI を考慮しないものとした. すなわち式(9-12)で求められるリンク容量において $I_0(u)=0$ とした.

PF スケジューリング規範では, 次式が最大となる多重 UE の組み合わせ $Y_U(t)$ を選択する.

$$Y(t) = \arg \max_{Y_U(t) \subset Y} \sum_{u \in Y_U(t)} \frac{\hat{C}_u(t, Y_U(t))}{\bar{C}_u(t-1)} \quad (14)$$

ここで $\bar{C}_u(t)$ は第 u 番目 UE の第 t タイムスロットにおける移動平均リンク容量であり, 次式で表される.

$$\bar{C}_u(t) = \begin{cases} \left(1 - \frac{1}{T_{\text{PF}}}\right) \bar{C}_u(t-1) + \frac{1}{T_{\text{PF}}} C_u(t) & u \in Y(t) \\ \left(1 - \frac{1}{T_{\text{PF}}}\right) \bar{C}_u(t-1) & u \notin Y(t) \end{cases} \quad (15)$$

T_{PF} は移動平均区間である.

RR スケジューリング規範では, UE の瞬時チャンネル状態を考慮することなく, 各 UE に順番に U 台の多重 UE を選択する.

4. モンテカルロ計算機シミュレーション

4.1 シミュレーション設定

本報告で仮定する CDAT を用いるネットワークモデルを図 2 に示す. 半径 R の各マクロセルには $N_{\text{macro}}=19$ 本の分散アンテナを規則的に配置し, 各分散アンテナが半径 $R' = R/\sqrt{19}$ の小セルをカバーしている. N_{ue} 本のアンテナを有する U_{act} 台の UE を各マクロセルにランダムに配置する. 中央のマクロセル(#0)を注目セルとし, 注目セルが単一で存在する孤立セル条件と注目セルの周辺に 6 つのマクロセルが存在するマルチセル条件とで評価を行う. 各 MBS はマルチユーザスケジューリングにより選択された U 台の UE と通信を行う. 各マクロセルにおいて N_{mbs} 本の分散アンテナを瞬時電力が大きい順に送信アンテナとして選択する.

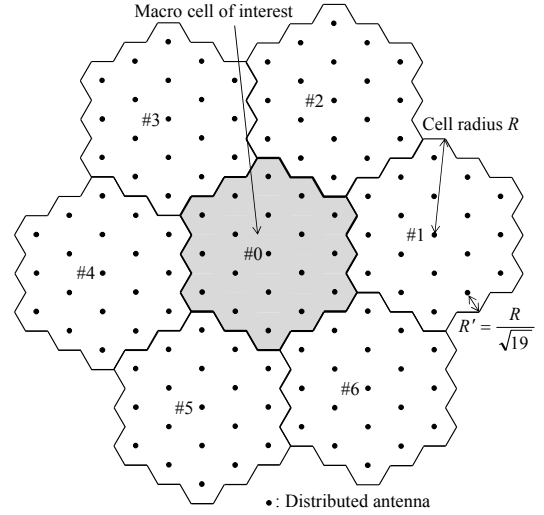


図 2 CDAT を用いるネットワークモデル ($N_{\text{macro}}=19$)

広帯域無線チャンネルは, 伝搬損失, シェドウイング損失およびマルチパスフェージングによって特徴づけられる. 遅延時間の異なる L 個の分散パスからなるマルチパスフェージングを仮定するとき, u 番目 UE の第 n_{ue} アンテナと MBS の第 n_{mbs} 分散アンテナ間のチャンネルのインパルス応答およびチャンネル伝達関数はそれぞれ次式で表される.

$$h_u(\tau; n_{\text{ue}}, n_{\text{mbs}}) = \sqrt{d_{u, n_{\text{mbs}}}^{-\alpha} 10^{-\frac{\eta_{u, n_{\text{mbs}}}}{10}}} \times \left\{ \begin{aligned} & \sqrt{\frac{K}{K+1}} \exp(j\theta_{u, n_{\text{ue}}, n_{\text{mbs}}}) \delta(\tau - \tau_{u, n_{\text{ue}}, n_{\text{mbs}}}(0)) \\ & + \sqrt{\frac{1}{K+1}} \sum_{l=0}^{L-1} \xi_{u, n_{\text{ue}}, n_{\text{mbs}}}(l) \delta(\tau - \tau_{u, n_{\text{ue}}, n_{\text{mbs}}}(l)) \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

$$H_u(k; n_{\text{ue}}, n_{\text{mbs}}) = \sqrt{d_{u, n_{\text{mbs}}}^{-\alpha} 10^{-\frac{\eta_{u, n_{\text{mbs}}}}{10}}} \times \left\{ \begin{aligned} & \sqrt{\frac{K}{K+1}} \exp(j\theta_{u, n_{\text{ue}}, n_{\text{mbs}}}) \exp\left(-j \frac{2\pi k \tau_{u, n_{\text{ue}}, n_{\text{mbs}}}(0)}{N_c}\right) \\ & + \sqrt{\frac{1}{K+1}} \sum_{l=0}^{L-1} \xi_{u, n_{\text{ue}}, n_{\text{mbs}}}(l) \exp\left(-j \frac{2\pi k \tau_{u, n_{\text{ue}}, n_{\text{mbs}}}(l)}{N_c}\right) \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

本報告では, u 番目 UE と第 n_{mbs} 分散アンテナ間の距離 $d_{u, n_{\text{mbs}}} \leq R'$ のとき仲上レイスフェージング環境(すなわち主要波と散乱波の電力比 $K > 0$), $d_{u, n_{\text{mbs}}} > R'$ のときレイリーフェージング環境($K=0$)になると仮定する. α は伝搬損失指数, $\eta_{u, n_{\text{mbs}}}$ は零平均で標準偏差 σ_s の正規分布に従うシェドウイング損失 (dB) を表す. $\theta_{u, n_{\text{ue}}, n_{\text{mbs}}}$ は主要波の位相であり, 一様分布に従うと仮定する. $\xi_{u, n_{\text{ue}}, n_{\text{mbs}}}(l)$ および $\tau_{u, n_{\text{ue}}, n_{\text{mbs}}}(l)$ はそれぞれ第 l パスの複素パス利得および遅延時間であり, 本報告ではサンプリング間隔 T_s の整数倍の遅延時間(すなわち $\tau_{u, n_{\text{ue}}, n_{\text{mbs}}}(l) = l T_s$ for all $u, n_{\text{ue}}, n_{\text{mbs}}$) を有する分散パスを仮定し, $E[\sum_{l=0}^{L-1} |\xi_{u, n_{\text{ue}}, n_{\text{mbs}}}(l)|^2] = 1$ for all $u, n_{\text{ue}}, n_{\text{mbs}}$ である. N_c はサブキャリア数を表す. $H_u(k; n_{\text{ue}}, n_{\text{mbs}})$ は MBS-UE 間の MU-MIMO チャンネル行列 $\mathbf{H}(k)$ の第 $(u \cdot N_{\text{ue}} + n_{\text{ue}}, n_{\text{mbs}})$ 要素

である。各パス間、アンテナ間、タイムスロット間のフェージングは独立で無相関と仮定した。また、チャネル推定は理想的に行えるものと仮定した。表 1 に本報告で用いたシミュレーション諸元を示す。

注目セルの u 番目 UE と第 c セルの第 n_{mbs} 分散アンテナ間のチャネル伝達関数を $H_u(k; n_{\text{uc}}, n_{\text{mbs}}(c))$ とすると、周辺セル ($c=1\sim 6$) から注目セルの u 番目 UE への CCI の電力スペクトル密度を以下の計算を用いた。

$$\begin{aligned} \frac{I_0(u)}{N_0} &= \left(\frac{E_s}{N_0} \right) \sum_{c=1}^6 \sum_{u(c)=0}^{U-1} \sum_{n_{\text{strm}}=0}^{N_{\text{strm}}-1} \sum_{n_{\text{mbs}}(c)=0}^{N_{\text{mbs}}-1} \\ &E \left[\left| H_u(k; n_{\text{uc}}, n_{\text{mbs}}(c)) W_{\text{mbs}}(k; n_{\text{mbs}}(c), u(c) \cdot N_{\text{strm}} + n_{\text{strm}}) \right|^2 \right] \quad (18) \\ &= \frac{U \cdot N_{\text{strm}}}{N_{\text{mbs}}} \left(\frac{E_s}{N_0} \right) \sum_{c=1}^6 \sum_{n_{\text{mbs}}(c)=0}^{N_{\text{mbs}}-1} \left(d_{u, n_{\text{mbs}}(c)}^{-\alpha} \cdot 10^{-\eta_{u, n_{\text{mbs}}(c)}/10} \right) \end{aligned}$$

ここで、 $W_{\text{mbs}}(k; n_{\text{mbs}}(c), u(c) \cdot N_{\text{strm}} + n_{\text{strm}})$ は第 c セルの送信フィルタ行列 $\mathbf{W}_{\text{mbs}}(k)$ の第 $(n_{\text{mbs}}, u \cdot N_{\text{strm}} + n_{\text{strm}})$ 要素である。

UE 間の公平性の指標である FI (Fairness index) は以下のように定義した [15]。

$$\text{FI} = \frac{\left(\sum_{u=0}^{U_{\text{act}}-1} \frac{1}{T_{\text{ave}}} \sum_{t=0}^{T_{\text{ave}}-1} C_u(t) \right)^2}{U_{\text{act}} \sum_{u=0}^{U_{\text{act}}-1} \left(\frac{1}{T_{\text{ave}}} \sum_{t=0}^{T_{\text{ave}}-1} C_u(t) \right)^2} \quad (19)$$

T_{ave} は $C_u(t)$ の時間平均区間であり、 $T_{\text{ave}} \gg T_{\text{PF}}$ とした。

表 1 計算機シミュレーション諸元

Network	No. of distributed antennas	$N_{\text{macro}}=19$
	Small cell radius	$R' = R \sqrt{N_{\text{macro}}}$
Transmitter /Receiver	No. of subcarrier	$N_c = 128$
	Guard interval length	$N_g = 16$
	No. of multiplexed UEs	$U = 2, 3, 4$
	No. of active UEs	$U_{\text{act}} = 19$
	No. of UE receive antennas	$N_{\text{uc}} = 2$
	No. of MBS transmit antennas	$N_{\text{mbs}} = U \cdot N_{\text{uc}}$
	Normalized transmit E_s/N_0	$E_s/N_0 = 0\text{dB}$
Channel	Path loss exponent	$\alpha = 3.5$
	Shadowing loss standard deviation	$\sigma_s = 7\text{dB}$
	Fading	Nakagami-Rice ($K = 10\text{dB}$) /Rayleigh
	Power delay profile	$L = 16\text{-path uniform}$

4.2 計算機シミュレーション結果

図 3 に、孤立セル環境における平均合計リンク容量と平均 FI の関係を示す。図 3 より、多重 UE 数 U が多くなるほど、同時送信するストリーム数が多くなるため合計リンク容量が大きくなることわかる。Max-SNR スケジューリング規範は、高い合計リンク容量を達成できるものの、チャネル状態の良い分散アンテナ近傍に存在する UE に通信機会を多く与えてしまうため FI は小さくなる。一方 RR スケジューリング規範および PF スケジューリング規範では、UE 間の公平性を保つようにマクロセル全体の UE に通信機会を与えるよう動作するため高い FI を確保できる。

合計リンク容量に注目して MMSE-SVD と BD-SVD を比較すると、多重 UE 数 U を多くするほど MMSE-SVD が BD-SVD より高い合計リンク容量を達成でき、 $U=4$ のときいずれのスケジューリング規範においても約 5% 程度高いリンク合計容量を達成できる。

また、FI に注目して MMSE-SVD と BD-SVD を比較すると、Max-SNR では MMSE-SVD と BD-SVD の差は僅かであるが、RR および PF では U を多くするほど MMSE-SVD が BD-SVD より高い FI を達成できることわかる。これは、BD-SVD では U が多くなると BD 処理により得られる等価チャネル利得が低下し、チャネル状態の悪い UE のリンク容量が大きく低下してしまうが、MMSE-SVD では残留 IAI と残留 IUI を許容することで等価チャネル利得の低下を回避できるためである。

図 4 にマルチセル環境下における平均合計リンク容量と平均 FI の関係を示す。図 4 より、孤立セル環境と比較して、周辺セルからの CCI の影響により、合計リンク容量が低下するのがわかる。またマルチセル環境では RR が PF より高い合計リンク容量を達成できることわかる。これは、マルチユーザスケジューリング時の期待リンク容量計算においては CCI を考慮していないため、PF ではセル端 UE の通信機会が多くなってしまうためと考えられる。RR は簡易なスケジューリング処理でありながら、PF よりも高い合計リンク容量を達成できる。

合計リンク容量に注目して MMSE-SVD と BD-SVD を比較すると、 $U=4$ のとき MMSE-SVD が BD-SVD より Max-SNR では約 2%、PF では約 14%、RR では約 17% 高い合計リンク容量を達成できる。これは MMSE-SVD が MBS において CCI を考慮したフィルタリングであるため CCI の影響を低減することができるためである。Max-SNR と比較して RR および PF で MMSE-SVD と BD-SVD の特性差が大きくなるのは、RR および PF ではマクロセル全体の UE に通信機会を与えるためセル端の UE が通信する機会が増えるためである。

また、FI に注目して MMSE-SVD と BD-SVD を比較すると、孤立セルのときと同様に、マクロセル全体の UE に通信機会を与える RR および PF では U を大きくするほど MMSE-SVD が BD-SVD より高い FI を達成できることわかる。

5. むすび

直交周波数分割多重 (OFDM) 下りリンク CDAT における MMSE-SVD および BD-SVD を対象に、3 つのマルチユーザスケジューリング規範 (Max-SNR, PF, RR) 適用時の合計リンク容量を計算機シミュレーションにより評価した。マクロセル全体の UE にほぼ公平に通信機会を与える RR および PF を用いるとき、多重 UE 数 U を多くするほど MMSE-SVD が BD-SVD より高い公平性を達成できることを明らかにした。また、多重 UE 数 U を大きくするほど MMSE-SVD は BD-SVD より大きな合計リンク容量を達成でき、CCI の影響が大きいほど BD-SVD と比較して MMSE-SVD の優位性が

顕著になることを明らかにした。また、CDAT では UE 間のチャネル品質の差が小さいため、簡易なスケジューリング処理である RR を用いても高い合計リンク容量と公平性を期待できる。

今後は、CCI を低減するマルチユーザスケジューリング規範の検討を行う予定である。

謝 辞

本報告の一部は、総務省委託研究開発「第 5 世代移動通信システム実現に向けた研究開発～超高密度マルチバンド・マルチアクセス多層セル構成による大容量化技術の研究開発～」(#0155-0171, 2015 年 9 月)による委託を受けて実施した研究開発による成果である。

文 献

- [1] ARIB 2020 and Beyond Ad Hoc Group, "Mobile communications system for 2020 and beyond", White paper, Oct. 2014.
- [2] J. G. Proakis and M. Salehi, *Digital communications*, 5th ed., McGraw-Hill, 2008.
- [3] F. Adachi, K. Takeda, T. Yamamoto, R. Matsukawa, and S. Kumagai, "Recent advances in single-carrier distributed antenna network," *Wirel. Commun. Mob. Comput.*, vol. 11, no. 12, pp. 1551-1563, Dec. 2011.
- [4] 箕輪, 関, 奥村, 須山, 大高, 木村, 中津川, 浅野, 市川, 平野, 山尾, 安達, 中沢, "[依頼講演]5G 実現に向けた超高密度マルチバンド・マルチアクセス多層セル構成による大容量化技術の研究開発の概要," 信学技報, RCS2015-250, pp. 41-46, 2015 年 12 月.
- [5] D. Gesbert, M. Kountouris, R. W. Heath Jr., C.-B. Chae, and T. Sälzer, "Shifting the MIMO paradigm," *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 24, no. 5, pp. 36-46, Oct. 2007.
- [6] R. Heath, S. Peters, Y. Wang, and J. Zhang, "A current perspective on distributed antenna systems for the downlink of cellular systems," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 51, no. 4, pp. 161-167, Apr. 2013.
- [7] 熊谷, 松川, 小原, 山本, 安達, "分散アンテナネットワークにおけるマルチユーザ MIMO の適用効果," 信学会総合大会, B-5-29, pp. 428, 2012 年 3 月.
- [8] B. M. Hochwald, B. Peel and A. L. Swindlehurst, "A vector-perturbation technique for near-capacity multi antenna multiuser communication - Part I: channel inversion and regularization," *IEEE Trans. Commun.*, vol.53, no.1, pp.195-202, Jan. 2005.
- [9] S. Yoshioka, S. Kumagai and F. Adachi, "Joint Tomlinson-Harashima precoding and transmit equalization in time-domain for single-carrier MU-MIMO block transmission," *2015 IEEE 81st Vehicular Technology Conference: VTC2015-Spring*, Glasgow, Scotland, May 2015.
- [10] B. Peel, B.M. Hochwald and A. L. Swindlehurst, "A vector-perturbation technique for near-capacity multi antenna multiuser communication - Part II: Perturbation," *IEEE, Trans. Commun.*, vol.53, no.3, pp.195-202, Mar. 2005.
- [11] Q. H. Spencer, A. L. Swindlehurst, and M. Haardt, "Zero-forcing methods for downlink spatial multiplexing in multiuser MIMO channels," *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 52, no. 2, pp. 461-471, Feb. 2004.
- [12] S. Kumagai, Y. Seki and F. Adachi, "Joint Tx/Rx signal processing for distributed antenna MU-MIMO downlink," *2016 IEEE 84th Vehicular Technology*

Conference: VTC2016-Fall, Montréal, Canada, Sept. 2016.

- [13] 関, 安達, "分散アンテナ小セルネットワークにおける下りリンク MMSE-SVD 送受信協調フィルタリングに関するマルチセル環境下での検討," 信学技報, RCS2016-153, pp. 1-6, 2016 年 10 月.
- [14] E. Dahlman, S. Parkvall, and J. Sköld, *4G:LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband*, 2nd ed., Academic Press, 2014.
- [15] R. Jain, D. Chiu, and W. Hawe, "A Quantitative Measure of Fairness nad Discrimination for Resource Allocation in Shared Computer System," *DEC Research Report*, TR-301, Sept. 1984.
- [16] D. Tse and P. Viswanath, *Fundamentals of wireless communication*, Cambridge University Press, 2005.

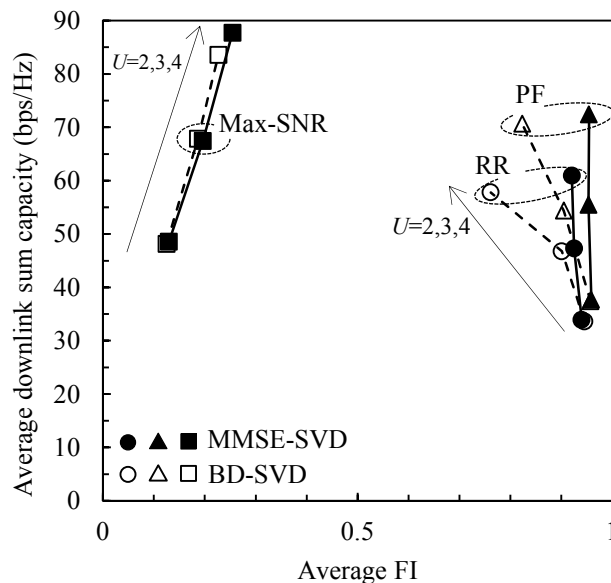


図 3 平均合計リンク容量と平均 FI の関係 (孤立セル)

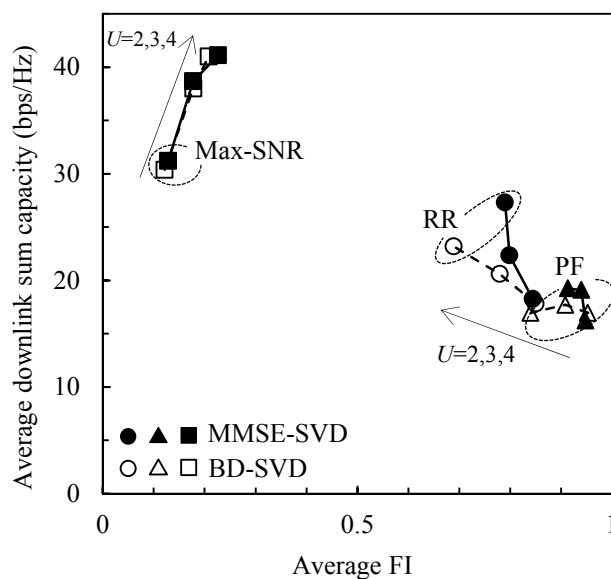


図 4 平均合計リンク容量と平均 FI の関係 (マルチセル)