

分散アンテナ OFDM 時空間ブロック符号化ダイバーシチ のための分散アンテナ選択に関する一検討

宮崎 寛之[†] 安達 文幸[‡]

東北大学大学院 工学研究科 通信工学専攻 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-05

E-mail: [†]miyazaki@mobile.ecei.tohoku.ac.jp, [‡]adachi@ecei.tohoku.ac.jp

あらまし 多数のアンテナをマクロセル内に分散配置し、複数の分散アンテナを用いて直交周波数分割多重 (OFDM) 時空間ブロック符号化 (STBC) ダイバーシチを行うことで、周波数選択性フェージングや伝搬損失およびシャドウィング損失の影響を軽減し、マクロセル全域で優れた伝送品質を達成することができる。また、分散アンテナ (DA) 選択の範囲を隣接マクロセルに拡張するマクロセル間連携を導入すれば受信信号電力を大きくでき、下りリンク容量をさらに増大できる。しかしながら下りリンク伝送の場合、隣接マクロセルの DA を送信ダイバーシチアンテナとして使用すると隣接マクロセルへの与干渉を増大させてしまうことから、下りリンク容量の改善には限界があった。

そこで本稿では、マクロセル間連携分散アンテナ OFDM-STBC ダイバーシチのための Max-sum 規範に基づく DA 選択と Max-min 規範に基づく DA 選択を提案する。前者は連携エリア全体の合計下りリンク容量を最大とするように、後者は連携エリア内の最小下りリンク容量を最大とするように、隣接マクロセルへの与干渉を考慮して DA 選択を行う。また提案 DA 選択では、選択 DA 集合に一本の DA を追加/除去したときの下りリンク容量の変分を漸化式により求め、その変分を最大とする DA を選択 DA 集合に逐次的に追加/除去していくことで、下りリンク容量を最大とする選択 DA 集合を決定する。Max-sum と Max-min 規範に基づく提案 DA 選択を用いたときの下りリンク容量を計算機シミュレーションにより求め、Max-sum 規範に基づく DA 選択を用いることで、与干渉を考慮せずに DA 選択を行った場合と比べて 5%アウテージ合計下りリンク容量を約 1.2 倍に向上できることを明らかにしている。

キーワード 分散アンテナを用いた小セルネットワーク、時空間ブロック符号化、アンテナ選択

Distributed Antenna Selection Schemes for Distributed Antenna OFDM Space-Time Block Coded Diversity

Hiroyuki MIYAZAKI[†] and Fumiyuki ADACHI[‡]

Dept. of Communications Engineering, Graduate School of Engineering, Tohoku University

6-6-05 Aza-Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai, 980-8579 Japan

E-mail: [†]miyazaki@mobile.ecei.tohoku.ac.jp, [‡]adachi@ecei.tohoku.ac.jp

Abstract Introduction of orthogonal frequency-division multiplexing (OFDM) space-time block coded (STBC) diversity to small-cell network using distributed antennas, in which a number of antennas are spatially deployed over each macro-cell, can mitigate the negative impacts of propagation path loss, shadowing loss and frequency-selective fading and achieve a good transmission quality over entire macro-cell. Furthermore, the introduction of macro-cell cooperation, in which distributed antennas (DAs) in adjacent macro-cells are also used as the diversity branches, can improve the downlink capacity. However, in downlink transmission, the use of DAs in adjacent macro-cells increases the giving interference to adjacent cells and therefore, the performance improvement by introducing the macro-cell cooperation is limited.

In this paper, we propose DA selections based on Max-sum criterion and Max-min criterion for distributed antenna OFDM-STBC diversity with macro-cell cooperation. The proposed DA selection based on Max-sum criterion selects DAs so as to maximize downlink sum capacity while that based on Max-min criterion selects DAs so as to maximize minimum downlink capacity with taking into account the giving interference to adjacent macro-cells. Furthermore, in the proposed schemes, the optimal selected DA groups are obtained sequentially by including/removing the DA which maximizes the variation of downlink capacity to selected DA group based on a recurrence formula of downlink capacity. We evaluate, by computer simulation, the downlink capacity in the distributed antenna OFDM-STBC diversity with the proposed adaptive DA selection and show that the proposed scheme can achieves about 1.2 times higher 5% outage downlink sum capacity than when using DA selection which does not consider the giving interference to adjacent macro-cells.

Keyword Small cell network using distributed antennas, space-time block coding, antenna selection

1. まえがき

通信エリア全体で高品質な広帯域データ伝送を実

現する手段として、分散アンテナを用いた小セルネットワークが近年盛んに検討されている[1,2]. 分散アン

テナを用いた小セルネットワークではひとつのベースバンド処理装置 (BBU) に有線 (例えば光リンク) 接続された多数の分散アンテナ (DA) がマクロセル内に分散配置されており, UE 周辺に高確率で DA が存在する. そのため, UE 近傍に存在する DA を用いることで伝搬損失およびシャドウイング損失の影響を軽減でき, マクロセル全域で優れた伝送品質を達成できる. また UE 近傍に存在する複数の DA を用いて直交周波数分割多重 (OFDM) 時空間ブロック符号化 (STBC) ダイバーシチ [3-6] を行えば, 周波数選択性フェージングの影響を避けつつ空間ダイバーシチ効果が得られ, より優れた伝送品質を達成できる. STBC ダイバーシチには, 受信 FDE と組み合わせたもの [5] と送信 FDE と組み合わせたもの [6] の 2 つがあり, 前者は受信機において, 後者は送信機においてチャンネル情報が必要となる. したがって受信 FDE を用いる STBC ダイバーシチを上りリンク伝送に, 送信 FDE を用いる STBC ダイバーシチを下りリンク伝送に適用すれば, チャンネル情報を必要とする FDE を BBU 側だけに持たせることができる.

これまで筆者らは, DA を用いる小セルネットワークに STBC ダイバーシチを導入することで, セル中央にアンテナが集中配置させる従来マクロセルネットワークより優れた上りリンク容量を達成できること, STBC ダイバーシチに使用する受信 DA 本数を増やすことで上りリンク容量を向上できることを明らかにしてきた [7]. また注目 UE が存在している自セル内の DA だけでなく, 周辺セル内の DA をもダイバーシチプランチとして用いるマクロセル間連携を導入すれば, さらに上りリンク容量を向上できることを明らかにした [8]. 一方下りリンク伝送では, 周辺セル内の DA を送信ダイバーシチアンテナとして使用すると, 空間ダイバーシチ効果により受信信号電力を増加できるものの, 隣接マクロセルへの与干渉を増大させてしまう. そのためマクロセル間連携を導入したとしても, 下りリンク容量の向上は限定的であった.

そこで本稿では, 下りリンク容量のさらなる向上をめざし, マクロセル間連携分散アンテナ OFDM-STBC ダイバーシチのための Max-sum 規範に基づく DA 選択と Max-min 規範に基づく DA 選択を提案している. 前者は連携エリア全体の合計下りリンク容量を最大とするように, 後者は連携エリア内の最小下りリンク容量を最大とするように, 隣接マクロセルへの与干渉を考慮した上で DA 選択を行う. また提案した Max-sum と Max-min 規範に基づく DA 選択では, 選択 DA 集合に一本の DA を追加/除去したときの下りリンク容量の変分を漸化式により求め, その変分を最大とする DA を選択アンテナ集合に追加/除去していくことで, 低演算量で下りリンク容量を最大とする選択 DA 集合を決定する. 提案した Max-sum と Max-min 規範に基づく DA 選択を用いたときの下りリンク容量を計算機シミュレーションにより求め, Max-sum 規範の DA 選択を用いることで与干渉を考慮せずに DA 選択を行った場合と比べて下りリンク容量を向上できることを明らかにしている.

本稿の構成は以下のとおりである. 第 2 章においてネットワークモデルについて述べた後, 第 3 章において, 送信 FDE を用いる OFDM-STBC ダイバーシチにおける送受信機構成および送受信信号表現について述べる. そして第 4 章においてマクロセル間連携分散アンテナ OFDM-STBC ダイバーシチのための

Max-sum と Max-min 規範に基づく DA 選択を提案する. 第 5 章において計算機シミュレーション結果を述べた後, 第 6 章にてまとめる.

2. 分散アンテナを用いた小セルネットワーク

本稿では, マクロセル間連携分散アンテナ OFDM-STBC ダイバーシチを用いた小セルネットワークにおける下りリンク伝送を仮定している. 図 1 に DA を用いた小セルネットワークにおけるネットワークモデルを示す. 全 19 マクロセルを考慮し, 中央の N_{cell} マクロセルが連携して DA 選択を行うものとしている. DA を用いた小セルネットワークでは, ひとつの BBU に有線接続された N_{DA} 本の DA がマクロセル内に一様に分散配置されており, 各 DA は半径 R' の六角形小セルをカバーしている. またマクロセル半径は R とする. 本稿では, マルチセルシングルユーザ環境を仮定しており, 各マクロセルには N_t 本のアンテナを搭載している UE がひとつ存在するものとする. また本稿ではマクロセル間連携を導入するものと仮定しており, 第 c セルの UE は自身が存在しているマクロセルおよび周辺マクロセルに存在する $7 \times N_{DA}$ 本の DA のうち, $N_{t,c}$ 本の DA を送信ダイバーシチアンテナとして選択して STBC ダイバーシチ伝送を行うものとする. なおチャンネルモデルは文献 [9] と同様のものを用いている.

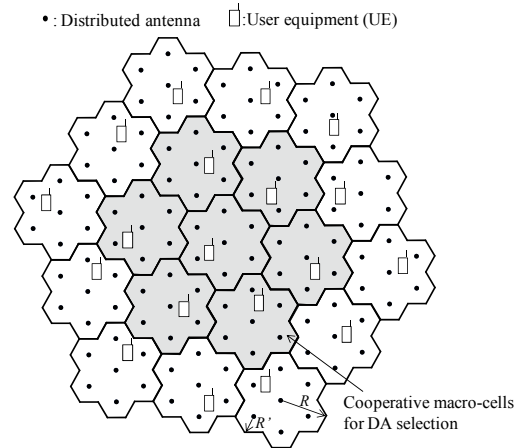


図 1 ネットワークモデル ($N_{DA}=7, N_{cell}=7$ の場合)

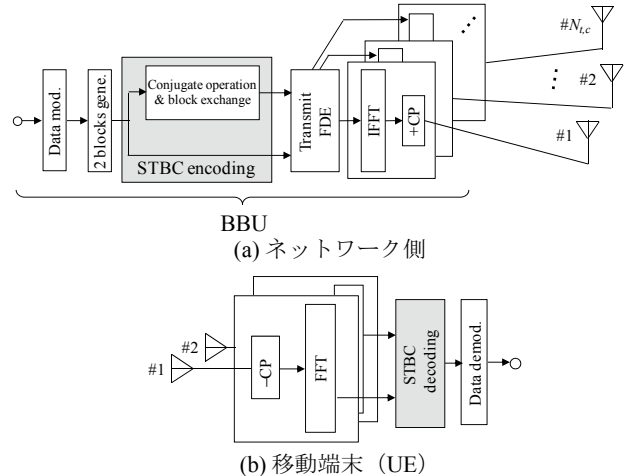


図 2 送受信機構成

3. 送信 FDE を用いる STBC ダイバーシチ

以降、サンプル間隔 T_s の離散時間等価低域表現を用いる。また第 c セル内の伝送に着目し、 $N_r=2$ の場合に着目して述べる。

3.1. 送受信信号表現

本稿では、送信 FDE を用いる OFDM-STBC ダイバーシチを導入した下りリンク伝送を仮定している。図 2 に送受信機構成を示す。BBU では、まず $J \times N_c$ シンボルからなるデータ変調後の送信信号系列を分割して、 N_c シンボルからなる J 個の送信信号ブロックを生成した後、生成した送信信号ブロックに対して STBC 符号化を適用し、 $N_r \times Q$ ブロックからなる STBC 符号化送信信号を生成する。第 $j(j=1, \dots, J)$ 送信信号ブロックを $\{D_{c,j}(k): k=1, \dots, N_c\}$ とすると、第 q STBC 符号化送信信号ベクトル $\mathbf{S}_{c,q}(k)=[S_{c,q}(1,k), \dots, S_{c,q}(N_t,k)]^T$ は次式で与えられる。

$$\begin{pmatrix} \mathbf{S}_{c,0}(k) & \mathbf{S}_{c,1}(k) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} D_{c,0}(k) & D_{c,1}(k) \\ -D_{c,1}^*(k) & D_{c,0}^*(k) \end{pmatrix} \quad (1)$$

ついで、BBU は STBC 符号化送信信号ブロックに対して送信 FDE を適用して $N_{t,c} \times Q$ ブロックからなる符号化信号を生成する。第 c マクロセル BBU の $N_{t,c} \times N_r$ 送信 FDE 重みを $\mathbf{W}_c(k)=[\mathbf{W}_c(1,k), \dots, \mathbf{W}_c(N_r,k)]$ および $\mathbf{W}_c(n_r,k)=[W_{c,1}(n_r,k), \dots, W_{c,N_{t,c}}(n_r,k)]^T$ とすると、送信 FDE 後の第 q STBC 符号化送信信号ベクトル $\mathbf{X}_{c,q}(k)=[X_{c,q}(1,k), \dots, X_{c,q}(N_{t,c},k)]^T$ は $\mathbf{X}_{c,q}(k)=\mathbf{W}_c(k)\mathbf{S}_{c,q}(k)$ で与えられる。その後、送信 FDE 後の信号に N_c ポイント逆高速フーリエ変換 (IFFT) を適用して OFDM シンボルを生成する。最後に、OFDM シンボルの先頭のガード区間にサイクリックプレフィックス (CP) を挿入した後、 $N_{t,c}$ 本のアンテナから DA に向けて信号を送信する。

UE では、受信信号から CP を除去した後、 N_c ポイント高速フーリエ変換 (FFT) を適用して N_c サブキャリアに直交分解する。第 n_r 受信アンテナにおける第 q 周波数領域受信信号を $\{R_q(n_r,k): k=1, \dots, N_c, n_r=1, \dots, N_r\}$ とすると、周波数領域受信信号ベクトル $\mathbf{R}_q(k)=[R_q(1,k), \dots, R_q(N_r,k)]^T$ は次式で表される。

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_{c,q}(k) &= \sqrt{2\hat{P}_t} \mathbf{H}_{c,c}(k) \mathbf{X}_{c,q}(k) \\ &+ \sqrt{2\hat{P}_t} \sum_{c' \in \mathbf{C}_c} \mathbf{H}_{c',c}(k) \mathbf{X}_{c',q}(k) + \mathbf{N}_{c,q}(k) \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 $\hat{P}_t = P_t R^{-\alpha}$ は UE の正規化送信電力であり、 P_t は UE の実際の送信電力である。また α は伝搬損失指数である。 $\mathbf{H}_{c',c}(k)$ は伝搬損失およびシャドウイング損失を含む第 c' マクロセル DA-第 c マクロセル UE 間の $N_r \times N_{t,c}$ 周波数領域チャネル行列である。第 c' マクロセル第 n_r DA-第 c マクロセル UE 第 n_t アンテナ間のチャネルの伝達関数を $H_{c',c}(n_r, n_t, k)$ とすると、 $\mathbf{H}_{c',c}(k)=[\mathbf{H}_{c',c}(1,k), \dots, \mathbf{H}_{c',c}(N_r,k)]$ および $\mathbf{H}_{c',c}(n_r, k)=[H_{c',c}(1, n_t, k), \dots, H_{c',c}(N_r, n_t, k)]^T$ で表される。また \mathbf{C}_c は第 c マクロセルの隣接マクロセルの集合である。また $\mathbf{N}_{c,q}(k)=[N_{c,q}(1,k), \dots, N_{c,q}(N_r,k)]^T$ は雑音ベクトルであり、 $N_{c,q}(n_r, k)$ は零平均分散 $2N_0/T_s$ の加法的白色ガウス雑音 (AWGN) である。ただし、 N_0 は片側雑音電力

スペクトル密度比である。その後 UE は受信信号に対して STBC 復号を行う。STBC 復号後の第 j 受信信号 $\{\hat{D}_{c,j}(k): k=1, \dots, N_c, j=1, \dots, J\}$ は次式で表される。

$$\begin{cases} \hat{D}_{c,0}(k) = \hat{R}_{c,0}(0,k) + \hat{R}_{c,1}^*(1,k) \\ \hat{D}_{c,1}(k) = \hat{R}_{c,0}(1,k) - \hat{R}_{c,1}^*(0,k) \end{cases} \quad (3)$$

最後にデータ復調を行う。

なお本稿では、送信 FDE 重み $\mathbf{W}_c(n_t, n_r, k)$ は最大比送信 (MRT) 規範に基づいて決定されるものとしており、次式で与えられる。

$$\mathbf{W}_c(n_t, n_r, k) = \frac{H_{c,c}^*(n_r, n_t, k)}{\sqrt{\frac{1}{N_c} \sum_{k=1}^{N_c} \sum_{n_r=1}^{N_r} \sum_{n_t=1}^{N_{t,c}} |H_{c,c}(n_r, n_t, k)|^2}} \quad (4)$$

3.2. 下りリンク容量

本稿では、STBC 復号後の条件付き瞬時受信信号対 (干渉+雑音) 電力比 (SINR) とシャノンの容量式 [10] に基づいて下りリンク容量を求める。第 c マクロセル UE における下りリンク容量 C_c (bps/Hz) は次式で与えられる。

$$C_c = \frac{1}{N_c} \sum_{k=1}^{N_c} \log_2(1 + \gamma_c(k)) \quad (5)$$

ここで、 $\gamma_c(k)$ は第 c マクロセル UE の第 k サブキャリアにおける STBC 復号後の瞬時受信 SINR であり、次式で与えられる。

$$\gamma_c(k) = \frac{2\hat{P}_t \left| \sum_{n_t=1}^{N_{t,c}} \sum_{n_r=1}^{N_r} H_{c,c}(n_r, n_t, k) \mathbf{W}_c(n_t, n_r, k) \right|^2}{\left[\hat{P}_t \sum_{c' \in \mathbf{C}_c} \sum_{n_t=1}^{N_{t,c'}} \sum_{n_r=1}^{N_r} |H_{c',c}(n_r, n_t, k) \mathbf{W}_{c'}(n_t, n_r, k)|^2 + N \cdot N_r \right]} \quad (6)$$

ただし $N=N_0/T_s$ は雑音電力である。右辺分母第 1 項が CCI 成分であり、第 2 項が雑音成分である。上式より、第 c マクロセルの送信 DA 本数 $N_{t,c}$ が大きくなるほど、第 c マクロセル UE の受信 SINR が大きくなるものの、周辺第 c' マクロセル UE における受信 SINR は低下することが分かる。したがって、ネットワーク全体の下りリンク容量を向上させるためには干渉を考慮して適切に送信 DA を選択する必要がある。

4. Max-sum と Max-min 規範に基づく分散アンテナ選択法

本稿では、マクロセル間連携分散アンテナ OFDM-STBC ダイバーシチを用いた下りリンク伝送に適した Max-sum と Max-min 規範に基づく DA 選択を提案している。提案 DA 選択では以下の 2 つの最適化問題に基づいて選択送信 DA の集合 $\mathbf{N}_{t,c}$ および送信 DA 本数 $N_{t,c} = |\mathbf{N}_{t,c}|$ を決定する。

$$\begin{cases} \mathbf{N}_{t,c}, N_{t,c} = |\mathbf{N}_{t,c}| \\ \{; c=1, \dots, N_{cell}\} \end{cases} = \begin{cases} \arg \max_{\mathbf{N}_{t,c}} \sum_{c=1}^{N_{cell}} C_c & \text{Max - sum criterion} \\ \arg \max \min C_c & \text{Max - min criterion} \end{cases} \quad (7)$$

ただし、上式の最適化問題は自マクロセルだけでなく周辺マクロセルの下りリンク容量をも考慮しているため、送信 DA 本数および送信 DA の組み合わせの数が膨大となってしまう。そのため、全探索によって最適な送信 DA 本数および送信 DA の組み合わせを決定することは実質不可能である。実現可能な演算量で最適なアンテナの組み合わせを求める手法として逐次アンテナ選択法[11]がある。逐次アンテナ選択法では、各アンテナを取り除いたときの目的関数の変分をそれぞれ求め、目的関数の変分を最大とするアンテナを逐次取り除いていくという動作を繰り返すことで、近似的に最適なアンテナの組み合わせを求める。しかしながら、本検討における目的関数は式(5)および(6)で与えられる下りリンク容量であるため、逐次アンテナ選択法を用いたとしても依然として演算量は大きい。

そこで本稿では、さらに低演算量で最適な送信 DA 本数および送信 DA の組み合わせを求める手法として、漸化式に基づく逐次 DA 選択を提案する。提案 DA 選択では、送信 DA 本数に対する下りリンク容量の漸化式を用いることで、簡易に各 DA を追加/除去したときの目的関数の変分をそれぞれ求める。そして目的関数の変分を最大とする DA を逐次追加/除去するという動作を繰り返すことで、近似的に最適な DA の組み合わせを求める。

4.1. 下りリンク容量の漸化式表現

まず第(4)を代入することで式(6)は以下のように変形できる。

$$\gamma_c(k) = \frac{2\hat{P}_t \left(\sum_{n_t=1}^{N_{t,c}} H_{A,c}(n_t, k) \right)^2 / \left(\sum_{n_t=1}^{N_{t,c}} H_{B,c}(n_t, k) \right)}{\left[\hat{P}_t \sum_{c' \in C_c} \left\{ \frac{\sum_{n_t=1}^{N_{t,c'}} H_{C,c',c}(n_t, k)}{\sum_{n_t=1}^{N_{t,c'}} H_{B,c'}(n_t, k)} \right\} + N \cdot N_r \right]} = \frac{2\hat{P}_t (\tilde{H}_{A,c,c}(k))^2 / \tilde{H}_{B,c}}{\left[\hat{P}_t \sum_{c' \in C_c} (\tilde{H}_{C,c',c}(k) / \tilde{H}_{B,c'}) + N \cdot N_r \right]} = \frac{P_s(k)}{P_{ccl}(k) + P_{noise}} \quad (8)$$

ここで、

$$\begin{cases} H_{A,c}(n_t, k) = \sum_{n_r=1}^{N_r} |H_{c,c}(n_r, n_t, k)|^2 \\ H_{B,c}(n_t) = \frac{1}{N_c} \sum_{k=1}^{N_c} \sum_{n_r=1}^{N_r} |H_{c,c}(n_r, n_t, k)|^2 \\ H_{C,c',c}(n_t, k) = \sum_{n_r=1}^{N_r} |H_{c',c}(n_r, n_t, k) H_{c,c'}^*(n_r, n_t, k)|^2 \end{cases} \quad (9)$$

である。また式(8)を用いて、第 c' ($c' \in C_c$) マクロセルの選択 DA 集合 $\mathbf{N}_{t,c'}$ から、第 n_t ' DA を追加/除去した場合における第 c セルの下りリンク容量の変分 $\Delta C_{c,(\mathbf{N}_{t,1}, \dots, \mathbf{N}_{t,c'} \pm n_t, \dots, \mathbf{N}_{t,N_{cell}})}$ は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \Delta C_{c,(\mathbf{N}_{t,1}, \dots, \mathbf{N}_{t,c'} \pm n_t, \dots, \mathbf{N}_{t,N_{cell}})} &= C_{c,(\mathbf{N}_{t,1}, \dots, \mathbf{N}_{t,c'} \pm n_t, \dots, \mathbf{N}_{t,N_{cell}})} - C_{c,(\mathbf{N}_{t,1}, \dots, \mathbf{N}_{t,N_{cell}})} \\ &= \log_2 \left(\prod_{k=1}^{N_c} \frac{1 + A_{c,c'}(n_t', k) \gamma_{c,(\mathbf{N}_{t,1}, \dots, \mathbf{N}_{t,N_{cell}})}(k)}{1 + \gamma_{c,(\mathbf{N}_{t,1}, \dots, \mathbf{N}_{t,N_{cell}})}(k)} \right) \quad (10) \end{aligned}$$

ここで、

$$A_{c,c'}(n_t', k) = \begin{cases} \frac{(1 + \varepsilon_{c'}(n_t') H_{A,c}(n_t', k) / \tilde{H}_{A,c}(k))^2}{(1 + \varepsilon_{c'}(n_t') H_{B,c}(n_t', k) / \tilde{H}_{B,c}(k))^2} & \text{if } c = c' \\ 1 & \text{if } c \neq c' \end{cases} \quad (11)$$

である。また $\varepsilon_{c'}(n_t')$ は DA を追加するか除去するかを示すインデックスであり、追加する場合は $\varepsilon_{c'}(n_t') = 1$ 、除去する場合は $\varepsilon_{c'}(n_t') = -1$ となる。式(10)より、第 n_t ' DA を追加/除去する前の下りリンク容量 $C_{c,(\mathbf{N}_{t,1}, \dots, \mathbf{N}_{t,N_{cell}})}$ 、受信 SINR $\gamma_{c,(\mathbf{N}_{t,1}, \dots, \mathbf{N}_{t,N_{cell}})}(k)$ および第 n_t ' DA を追加/除去時の受信 SINR 係数 $A_{c,c'}(n_t', k)$ が分かれば、第 n_t ' DA を追加/除去した後の下りリンク容量 $C_{c,(\mathbf{N}_{t,1}, \dots, \mathbf{N}_{t,N_{cell}})}$ が漸化式で容易に算出できることが分かる。ここで逐次 DA 選択を行う場合は、第 n_t ' DA を追加/除去する前の下りリンク容量 $C_{c,(\mathbf{N}_{t,1}, \dots, \mathbf{N}_{t,N_{cell}})}$ および受信 SINR $\gamma_{c,(\mathbf{N}_{t,1}, \dots, \mathbf{N}_{t,N_{cell}})}(k)$ は既知である。また式(11)中の等価チャネル $\tilde{H}_{A,c}(k)$ 、 $\tilde{H}_{B,c}$ および $\tilde{H}_{C,c',c}(k)$ は第 n_t ' DA を追加/除去する前の受信 SINR $\gamma_{c,(\mathbf{N}_{t,1}, \dots, \mathbf{N}_{t,N_{cell}})}(k)$ を算出する際に用いられるものなので、これらも既知である。したがって、第 n_t ' DA を追加/除去した後の下りリンク容量 $C_{c,(\mathbf{N}_{t,1}, \dots, \mathbf{N}_{t,N_{cell}})}$ を算出するために必要な新たな情報は注目 DA に対する等価チャネル $H_{A,c}(n_t', k)$ 、 $H_{B,c}(n_t')$ および $H_{C,c',c}(n_t', k)$ のみである。

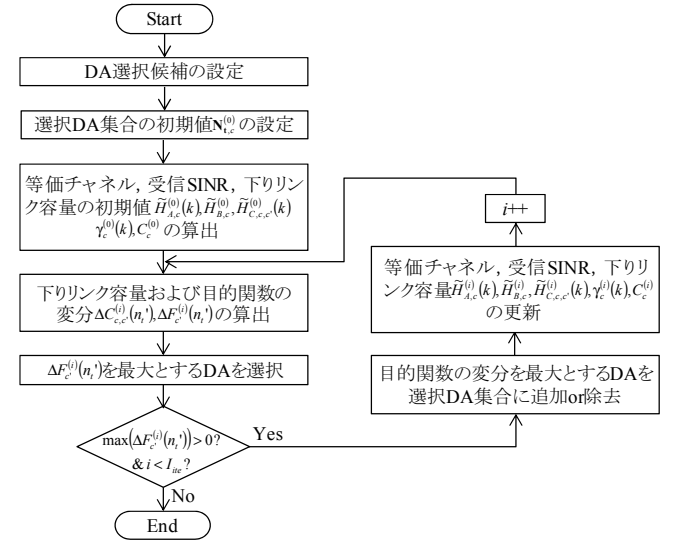


図3 適応 DA 選択フローチャート

4.2. 漸化式を用いた逐次分散アンテナ選択

式(10)および式(11)で与えられる漸化式を用いた DA 選択のフローチャートを図3に示す。まず提案 DA 選択では、始めに瞬時受信電力の降べき順に $N_{t,max}$ 本の DA を選択し、選択 DA 候補とする。以降その $N_{t,max}$ 本の DA の中から最適な選択 DA 数および DA の組み合わせを探る。ついで、 $N_{t,max}$ 本の選択 DA 候補の中から瞬時受信電力の大きい $N_{t,ini}$ の DA を選択し、選択 DA 集合の初期値 $\{\mathbf{N}_{t,c}^{(0)} : c=1, \dots, N_{cell}\}$ とした後、初期選択 DA 集合における等価チャネル $\tilde{H}_{A,c}^{(0)}(k)$ 、 $\tilde{H}_{B,c}^{(0)}$ 、 $\tilde{H}_{C,c',c}^{(0)}(k)$ 、受信 SINR $\gamma_c^{(0)}(k)$ および下りリンク容量 $C_c^{(0)}$ をそれぞれ算出する。

以降第 i ($i=1, \dots, I_{ite}$) 繰り返し時に着目して述べる．まず選択 DA 候補内の DA ごとに，その DA を選択 DA の集合に追加/除去した場合における第 c マクロセル UE の下りリンク容量および目的関数の変分を算出する．第 c' マクロセル第 n_i' DA を追加/除去した場合における第 c マクロセル UE の下りリンク容量および目的関数の変分 $\Delta C_{c,c'}^{(i)}(n_i')$ および $\Delta F_c^{(i)}(n_i')$ は次式で与えられる．

$$\Delta C_{c,c'}^{(i)}(n_i') = \prod_{k=1}^{N_g} \frac{1 + A_{c,c'}^{(i)}(n_i', k) \gamma_c^{(i-1)}(k)}{1 + \gamma_c^{(i-1)}(k)} \quad (12)$$

$$\Delta F_c^{(i)}(n_i') = \log_2 \left(\prod_{c=1}^{N_{cell}} \Delta C_{c,c'}^{(i)}(n_i') \right) \quad \dots \text{ if Max-sum criterion (13a)}$$

$$\Delta F_c^{(i)}(n_i') = \log_2 \left(\Delta C_{c,c'}^{(i)}(n_i') \right), \quad c = \arg \min_{c'=1, \dots, N_{cell}} C_{c'}^{(i-1)} \quad \dots \text{ if Max-min criterion (13b)}$$

次に，目的関数の変分を最大とする DA をひとつ選択する．そして，目的関数の変分の最大値が 0 以上かつ繰り返し回数が I_{ite} 未満の場合は，目的関数の変分を最大とする DA を選択 DA の集合に追加/除去する．その後，漸化式を用いて等価チャネル，受信 SINR および下りリンク容量を更新する．第 \tilde{c} マクロセル第 \tilde{n}_i DA が追加/除去されたとする，第 i 繰り返し時における第 c マクロセル UE の逐次 DA 選択後の等価チャネル $\tilde{H}_{A,c}^{(i)}(k)$ ， $\tilde{H}_{B,c}^{(i)}(k)$ ， $\tilde{H}_{C,c}^{(i)}(k)$ ，受信 SINR $\gamma_c^{(i)}(k)$ および下りリンク容量 $C_c^{(i)}(k)$ は次式で与えられる．

$$\begin{cases} \tilde{H}_{A,c}^{(i)}(k) = \tilde{H}_{A,c}^{(i-1)}(k) + \varepsilon_{\tilde{c}}(\tilde{n}_i) H_{A,c}(n_i', k), & \gamma_c^{(i)}(k) = \gamma_c^{(i-1)}(k) + \varepsilon_{\tilde{c}}(\tilde{n}_i) A_{c,\tilde{c}}^{(i)}(\tilde{n}_i) \gamma_c^{(i-1)}(k) \\ \tilde{H}_{B,c}^{(i)}(k) = \tilde{H}_{B,c}^{(i-1)}(k) + \varepsilon_{\tilde{c}}(\tilde{n}_i) H_{B,c}(n_i', k), & C_c^{(i)}(k) = C_c^{(i-1)}(k) + \varepsilon_{\tilde{c}}(\tilde{n}_i) \Delta C_{c,\tilde{c}}^{(i)}(\tilde{n}_i) \\ \tilde{H}_{C,c}^{(i)}(k) = \tilde{H}_{C,c}^{(i-1)}(k) \end{cases} \quad \text{if } c = \tilde{c}, \quad (14a)$$

$$\begin{cases} \tilde{H}_{A,c}^{(i)}(k) = \tilde{H}_{A,c}^{(i-1)}(k), & \gamma_c^{(i)}(k) = \gamma_c^{(i-1)}(k) + \varepsilon_{\tilde{c}}(\tilde{n}_i) A_{c,\tilde{c}}^{(i)}(\tilde{n}_i) \gamma_c^{(i-1)}(k) \\ \tilde{H}_{B,c}^{(i)}(k) = \tilde{H}_{B,c}^{(i-1)}(k), & C_c^{(i)}(k) = C_c^{(i-1)}(k) + \varepsilon_{\tilde{c}}(\tilde{n}_i) \Delta C_{c,\tilde{c}}^{(i)}(\tilde{n}_i) \\ \tilde{H}_{C,c}^{(i)}(k) = \tilde{H}_{C,c}^{(i-1)}(k) + \varepsilon_{\tilde{c}}(\tilde{n}_i) H_{C,c,\tilde{c}}(n_i', k) \end{cases} \quad \text{if } c \neq \tilde{c}, \quad (14b)$$

このようにして，第 i 繰り返し時における逐次 DA 選択を行った後，次の繰り返しに移行する．目的関数の変分の最大値が 0 未満もしくは繰り返し回数が I_{ite} 以上となった場合，繰り返し処理を終了し，逐次 DA 選択によって選ばれた DA を用いて STBC ダイバシティ伝送を行う．

5. 計算機シミュレーション

提案 DA 選択を導入したマクロセル間連携分散アンテナ OFDM-STBC ダイバシティを用いる小セルネットワークにおける下りリンク容量を計算機シミュレーションにより求めた．FFT ブロックサイズ N_c および CP 長 N_g はそれぞれ $N_c=128$ および $N_g=16$ とする．また UE アンテナ本数 N_t は $N_t=2$ としている．連携マクロセル数は $N_{cell}=7$ ，マクロセル内 DA 数は $N_{DA}=7$ とし，各 DA の小セル半径は $R'=R/\sqrt{7}$ としている．伝搬損失指数 α およびシャドウィング損失の標準偏差 σ はそれぞれ $\alpha=3.5$ および $\sigma=7.0\text{dB}$ と仮定している．UE-DA 間距離が小セル半径以下の場合は，フェージングチャネルが K ファクタ $K=10\text{dB}$ および一様電力遅延プロファイルを有する $L=16$ パスの周波数選択性伸上・ライスフェージングによって特徴づけられ，UE-DA 間距離が小セル半径より大きい場合は，フェージングチャネルが一

様電力遅延プロファイルを有する $L=16$ パスの周波数選択性レイリーフェージングによって特徴づけられるものと仮定している．また本シミュレーションでは干渉リミテッド環境を仮定している．DA 選択における最大選択 DA 数は $N_{i,max}=7$ とし，初期選択 DA 数は $N_{i,ini}=3$ としている．また DA 選択に必要なチャネル情報は理想的に得られるものと仮定している．下りリンク容量の累積分布関数 (CDF) を計算機シミュレーションにより求め，CDF の $x\%$ 値を $x\%$ アウテージ下りリンク容量とよぶ．

5.1. Max-sum と Max-min 規範に基づく分散アンテナ選択の動作

図 4 に提案 DA 選択における選択 DA の様子を示す．ただし，考察の便宜上，シャドウィング損失およびフェージング変動はないものとしている．図 4 より，提案 DA 選択では同一チャネル干渉 (CCI) の影響が小さくなるよう，各マクロセル UE はそれぞれ異なる DA を選択するように動作していることが分かる．また図 4(a) より，Max-sum 規範に基づく DA 選択では，チャネル状態のよいマクロセル UE がより多くの DA を選択していることが分かる．これは，チャネル状態の悪いマクロセル UE の下りリンク容量より，チャネル状態の良いマクロセル UE の下りリンク容量を向上させた方がネットワーク全体の合計下りリンク容量が向上するためである．一方で，図 4(b) より，Max-min 規範に基づく DA 選択では，チャネル状態の良いマクロセル UE の選択 DA 本数を少なくし，チャネル状態の悪いマクロセル UE がより多くの DA を選択するように動作していることがわかる．これは，CCI を低減しつつ，チャネル状態の悪いマクロセル UE の信号電力を大きくするためである．

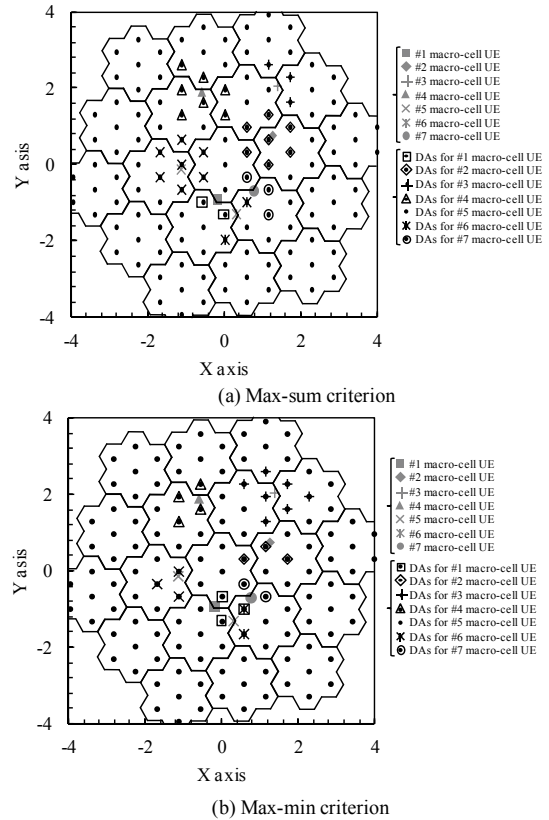


図 4 提案 DA 選択法の動作

5.2. 下りリンク容量の CDF 分布

図 5 に提案 DA 選択を導入したマクロセル間連携分散アンテナ STBC ダイバーシチを用いる小セルネットワークにおける第 1 セル下りリンク容量を示す。また比較のため、与干渉を考慮せずに瞬時受信電力に基づいて常に最大の送信 DA 本数を選択する場合における特性も同様に図 5 に示す。図 5 より、Max-sum 規範の DA 選択を行うことで、与干渉を考慮せずに DA 選択を行った場合と比較して、50%アウテージ下りリンク容量を約 1.3 倍に向上できるものの、1%アウテージ下りリンク容量は劣化してしまうことが分かる。これは、Max-sum 規範の DA 選択では、合計下りリンク容量が最大となるようチャンネル状態の良いマクロセル UE がより多くの DA を選択するように動作するためである。一方、Max-min 規範の DA 選択は、チャンネル状態の悪い UE の品通信品質を向上するように動作するため、1%アウテージ下りリンク容量を向上できるが、その改善量は限定的である。これは DA を用いた小セルネットワークでは、マクロセル UE の通信品質がほぼ均一であり、与干渉を考慮せずに DA 選択を行った場合でも十分な公平性が得られるためである。このことから、与干渉を考慮せずに DA 選択を行っても十分な 1%アウテージ下りリンク容量を達成できるといえる。

また、図 6 に合計下りリンク容量の CDF 分布を示す。また比較のため与干渉を考慮せずに瞬時受信電力に基づいて常に最大の送信 DA 本数を選択する場合における特性も同様に図 6 に示す。図 6 より、Max-sum 規範の DA 選択を用いることで、与干渉を考慮せずに DA 選択を行った場合より、常に高い合計下りリンク容量を達成できることが分かる。たとえば、Max-sum 規範の DA 選択を用いることで、与干渉を考慮せずに DA 選択を行った場合と比較して、5%アウテージ合計下りリンク容量を約 1.2 倍に、50%アウテージ合計下りリンク容量を約 1.1 倍に向上できる。

6. まとめ

本稿では、下りリンク容量のさらなる向上を目指し、マクロセル間連携分散アンテナ OFDM-STBC ダイバーシチのための Max-sum と Max-min 規範に基づく DA 選択を提案した。提案 DA 選択を用いるときの下りリンク容量を計算機シミュレーションにより求め、Max-sum 規範に基づく DA 選択を用いることで、与干渉を考慮せずに DA 選択を行った場合と比べて 5%アウテージ合計下りリンク容量を約 1.2 倍に向上できることを明らかにした。

謝 辞

本稿は、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] 瀬山崇志, 小林崇春, 伊達木隆, 関宏之, 箕輪守彦, 須山聡, 奥村幸彦, “5G 超高密度分散アンテナシステムにおける協調 MU-MIMO 送信の基礎検討,” 信学会ソサイエティ大会, B-5-65, 2015 年 9 月.
- [2] 筒井正文, 安藤和明, 秋山千代志, 伊達木隆, 関宏之, 箕輪守彦, 奥山達樹, 須山聡, 奥村幸彦, “5G 超高密度分散アンテナシステムにおける広帯域 MU-MIMO 伝

送特性の屋内実験検証,” 信学技報, vol. 115, no. 396, RCS2015-302, pp. 131-136, 2016 年 1 月.

- [3] S. M. Alamouti, “A simple transmit diversity technique for wireless communications,” IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. 16, no. 8, pp. 1451-1458, Oct. 1998.
- [4] V. Tarokh, H. Jafarkhani and A. R. Calderbark, “Space-time block coding for wireless communications: performance results,” IEEE J. Sel. Areas. Commun., vol. 17, no. 3, pp. 451-460, Mar. 1999.
- [5] K. Takeda, T. Itagaki, and F. Adachi, “Appliation of space-time transmit diversity to single carrier transmission with frequency-domain equalization and receive antenna diversity in a frequency-selective fading channel,” IEE Proc. Commun., vol. 151, no. 6, pp. 627-632, Dec. 2004.
- [6] H. Miyazaki and F. Adachi, “Transmit Multi-block FDE for space-time block coded joint transmit/receive diversity in a quasi-static fading channel,” IEICE Trans. Commun., vol. E98-B, no. 10, pp. 2068-2077, Oct. 2015.
- [7] R. Matsukawa, T. Obara, and F. Adachi, “Frequency-domain space-time block coded transmit/receive diversity for single-carrier distributed antenna network,” IEICE Communications Express (ComEX), vol. 2, no. 4, pp. 141-147, 15 Apr. 2013.
- [8] 宮崎寛之, 安達文幸, “分散アンテナ時空間ブロック符号化ダイバーシチへのマクロセル間連携の導入効果,” 信学技報, vol. 115, no. 369, RCS2015-273, pp. 175-180, 2015 年 12 月.
- [9] 熊谷慎也, 関裕太, 安達文幸, “分散アンテナ OFDM-MU-MIMO 下りリンクにおける UE スケジューリングの影響,” 信学技報, 2016 年 3 月発表予定
- [10] J. G. Proakis, Digital communication, 4th ed., McGraw-Hill, 2001.
- [11] A. F. Molisch, M. Z. Win, Y. -S. Choi and J. H. Winter, “Capacity of MIMO systems with antenna selection,” IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 4, no. 4, pp. 1759-1772, July 2005.

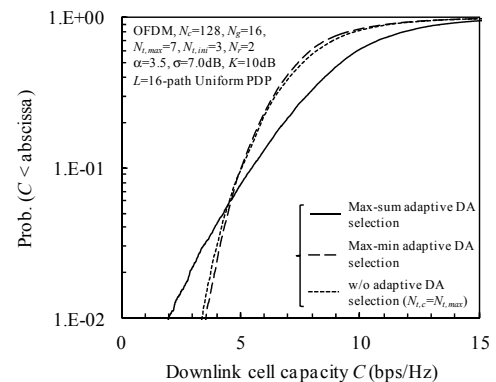


図 5 セル下りリンク容量の CDF 分布

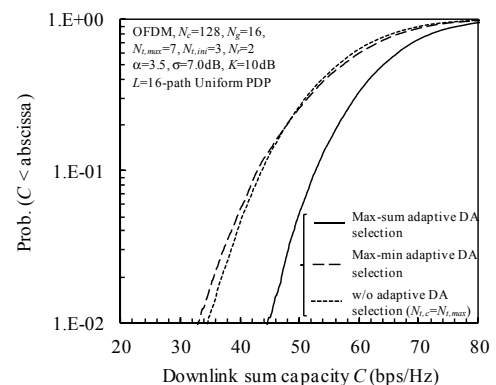


図 6 合計下りリンク容量の CDF 分布