

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

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させた分散アンテナを用いた小セルネットワークは、周波数選択性フェージングや伝搬損失およびシャドウイ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。その結果、マクロセル中央にアンテナが集中配置させた従来ネットワークよりも優れたセル端スループット特性を達成できる。また移動端末（UE）近傍に存在する複数の分散アンテナを用いて時空間ブロック符号化（STBC）ダイバーシチを行うことで、さらにセル端スループット特性を改善できる。しかしながら、これまでの検討では移動端末（UE）が存在するマクロセル内の分散アンテナしか利用していなかった。そのため、マクロセル端スループットの改善に限界があった。

そこで本稿では、マクロセル端スループットのさらなる改善を目指し、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マクロセル間連携を導入し、マクロセル境界を無くすことを検討している。マクロセル間連携では、UE が存在するマクロセルだけでなく周辺セルに存在する分散アンテナをもダイバーシチプランチ候補とし、瞬時受信電力の降べき順にアンテナを選択する。マクロセル間連携分散アンテナ STBC ダイバーシチを導入した小セルネットワークにおける上りリンク容量を計算機シミュレーションにより求め、マクロセル間連携の導入効果について議論している。

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、マクロセル間連携

Effect of Macro-cell Cooperation on Distributed Antenna Space-Time Block Coded Diversity

Hiroyuki MIYAZAKI[†] and Fumiayuki 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 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. An introduction of single-carrier (SC) space-time block coded (STBC) diversity using one or more distributed antennas close to user equipment (UE) can further improves the transmission quality. However, the transmission quality of a UE near the macro-cell edge is still poor compared to the cell center.

In this paper, to achieve higher macro-cell edge throughput, we introduce macro-cell cooperation to small-cell network using distributed antennas (DAs) and accordingly, remove the macro-cell borders. In macro-cell cooperative STBC diversity, DAs in adjacent macro-cells are also used as the diversity branches. We evaluate, by computer simulation, the uplink capacity in the small-cell network using macro-cell cooperative STBC diversity and discuss the effect of macro-cell cooperation.

Keyword Small cell network using distributed antennas, space-time block coding, macro-cell cooperation

1. まえがき

次世代移動無線通信システムでは、移動端末（UE）がセル端やビル陰など劣悪な環境に存在している場合においても高速かつ大容量なデータ伝送が求められている。しかしながら、上記のような環境では伝搬損失、シャドウイング損失および周波数選択性フェージングの影響により受信信号電力が大きく落ち込み、通信品質が著しく劣化してしまう[1]。そこで筆者らは、分散アンテナを用いた小セルネットワークを提唱している[2,3]。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が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）を

マクロセル内に分散配置するため、UE 周辺に高確率で DA が存在する。そのため、UE 近傍に存在する分散アンテナ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 を用いて時空間ブロック符号化（STBC）ダイバーシチ[4-6]を行えば、空間ダイバーシチ効果および周波数ダイバーシチ効果が得られ周波数選択性フェージングの影響をさらに低減でき、より優れた伝送品質を達成できる。上りリンクではピーク対平均送信電力比（PAPR）の低いシングルキャリア（SC）伝送が適している。SC-STBC ダイバーシチでは、送信局で必要な

信号処理は複素共役演算とブロック入れ替えのみであり、かつチャネル情報は不要であるため、送信局の構成を簡易にできる。したがって、SC-STBC ダイバーシチは上りリンク伝送に適している。

これまで筆者らは、DA を用いる小セルネットワークに SC-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している従来マクロセルネットワークより優れた伝送品質を達成できること、SC-STBC ダイバーシチに用いる DA 本数を増やすことでさらに伝送品質を向上できることを明らかにしてきた[7,8]。ただし、分散アンテナ SC-STBC ダイバーシチを導入した小セルネットワークに関するこれまでの検討では、ダイバーシチアンテナは注目 UE が存在する自セル内の DA からのみ選択するものと仮定していた。そのため、UE がセル端に存在している場合は空間ダイバーシチ利得の減少および同一チャネル干渉 (CCI) の影響により、伝送品質の改善には限界があった。

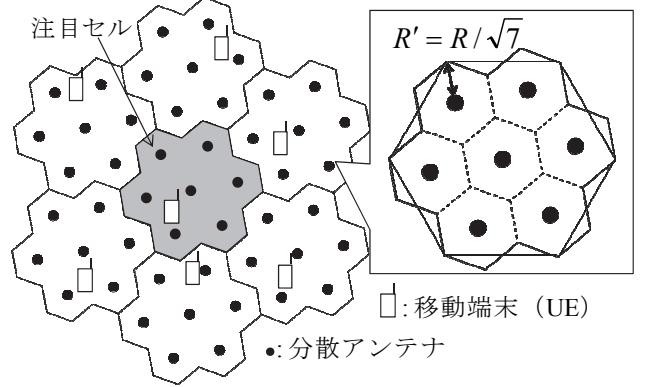
そこで本稿では、この問題を解決するため、分散アンテナ SC-STBC ダイバーシチを用いる小セルネットワークにマクロセル間連携を導入し、マクロセル境界を無くすことを検討している。マクロセル間連携分散アンテナ SC-STBC ダイバーシチでは、注目 UE が存在している自セル内の DA だけでなく、周辺セル内の DA をも受信ダイバーシチブランチとして用いることで、マクロセル端においても優れた伝送品質を達成できる。マクロセル間連携分散アンテナ SC-STBC ダイバーシチを用いる小セルネットワークにおける上りリンク容量を計算機シミュレーションにより求め、マクロセル間連携を導入することで、上りリンク容量をさらに改善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およびチャネルモデルについて述べた後、マクロセル間連携について述べる。第 3 章では、SC-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た後、SC-STBC ダイバーシチにおける上りリンク容量を導出している。第 4 章において計算機シミュレーション結果を述べた後、第 5 章にてまとめる。

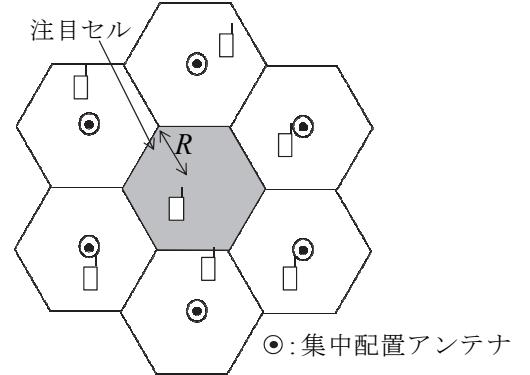
2. 分散アンテナを用いた小セルネットワーク

2.1. ネットワークモデル

本稿では、マクロセル間連携分散アンテナ SC-STBC ダイバーシチを導入した小セルネットワークにおける上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。中央マクロセルを注目マクロセルとし、その周辺に 6 つのマクロセルが存在するものと仮定している。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 7 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 $R' = R/\sqrt{7}$ の六角形小セルをカバーしている。ここで R はマクロセル半径である。一方従来マクロセルネットワークでは、マクロセル中央に 7 本のアンテナが集中配置しており、それぞれ BBU に直接接続されている。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。各 UE は周辺の N_r 本の DA を受信ダイバーシチブランチとして選択して SC-STBC ダイバーシチ伝送を行うものとする。



(a) 分散アンテナを用いた小セルネットワーク



(b) 従来マクロセルネットワーク

図 1 ネットワークモデル

2.2. チャネルモデル

UE-DA 間伝搬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って特徴づけられるものとする。ここで DA が UE の近傍に位置している場合は、UE-DA 間チャネルは見通し内環境になると考えられる。そこで本稿では、第 c マクロセル UE-第 c' マクロセル第 m DA 間距離 $d_{c,c'}(m)$ が小セル半径以下 ($d_{c,c'}(m) \leq R'$) の場合、フェージングチャネルは周波数選択性伸上・ライスフェージングによって特徴づけられるものとする。一方、第 c マクロセル UE-第 c' マクロセル第 m DA 間距離が小セル半径より大きい場合 ($d_{c,c'}(m) > R'$) は、UE-DA 間チャネルは見通し外環境になると考えられるため、フェージングチャネルは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している。以上のことから、第 c マクロセル第 n_t UE アンテナ-第 c' マクロセル第 m DA 間のチャネルのインパルス応答 $h_{c,c'}(n_t, m, \tau)$ は次式で表される。

$$h_{c,c'}(n_t, m, \tau)$$

$$= \left(d_{c,c'}(m) \right)^{-\frac{\alpha}{2}} \left\{ \begin{aligned} & \sqrt{\frac{K}{K+1}} e^{j\theta_{c,c'}(n_t, m)} \delta(\tau - \tilde{\tau}_{c,c'}(n_t, m)) \\ & + \sqrt{10^{-\frac{n_{c,c'}(m)}{10}}} \sqrt{\frac{1}{K+1}} \\ & \times \sum_{l=0}^{L-1} \xi_{c,c'}(n_t, m, l) \delta(\tau - \tau_{c,c'}(n_t, m, l)) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここで、 α は伝搬損失指数であり、 $\eta_{c,c'}(m)$ は第 c マクロセル UE-第 c' マクロセル第 m DA 間のシャドウイング損失 (dB) である。また $\theta_{c,c'}(n_t, m)$ は第 c マクロセル第 n_t UE アンテナ-第 c' マクロセル第 m DA 間チャネルの直接波の位相であり、 $\tilde{\tau}_{c,c'}(n_t, m)$ は直接波の遅延時間である。また $\xi_{c,c'}(n_t, m, l)$ は第 c マクロセル第 n_t UE アンテナ-第 c' マクロセル第 m DA 間チャネルの第 l 遅延パスの複素パス利得であり、 $\tau_{c,c'}(n_t, m, l)$ は第 l 遅延パスの遅延時間である。また K は仲上・ライスフェージングの K ファクタである。 $d_{c,c'}(m) \leq R'$ の場合は、伝搬チャネルは仲上・ライスフェージングによって特徴づけられるため、 $K > 0$ となる。一方 $d_{c,c'}(m) > R'$ の場合は、伝搬チャネルはレイリーフェージングによって特徴づけられるため $K=0$ となる。式(1)より、第 c マクロセル第 n_t UE アンテナ-第 c' マクロセル第 m DA 間リンクにおける瞬時受信信号電力 $P_{r,c,c'}(n_t, m)$ は次式で与えられる。

$$P_{r,c,c'}(n_t, m) = \hat{P}_t (\hat{d}_{c,c'}(m))^{\alpha} \left\{ \frac{K}{K+1} + \left(\frac{10^{\frac{\eta_{c,c'}(m)}{10}}}{K+1} \times \sum_{l=0}^{L-1} |\xi_{c,c'}(n_t, m, l)|^2 \right) \right\} \quad (2)$$

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。 $\hat{d}_{c,c'}(m) = d_{c,c'}(m)/R$ はマクロセル半径で正規化された第 c マクロセル UE-第 c' マクロセル第 m DA 間距離である。

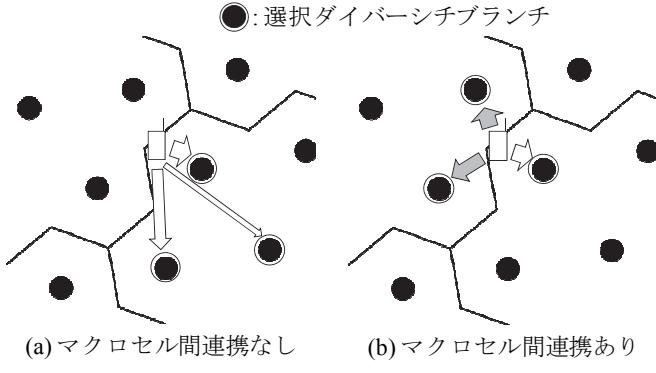


図 2 マクロセル間連携の動作

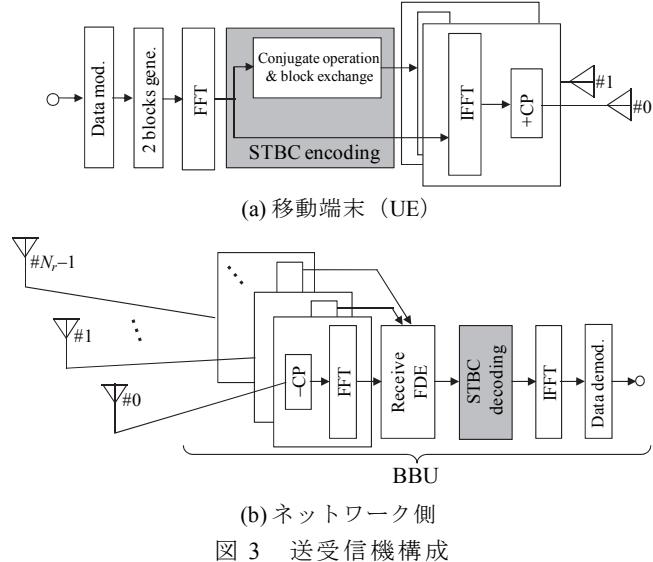


図 3 送受信機構成

2.3. マクロセル間連携ダイバーシチ

本稿では、セル端における通信品質をさらに改善するためにマクロセル間連携の導入について検討している。図 1 に示すように、DA を用いた小セルネットワークでは DA がセル内に分散配置している。そのため、注目 UE がセル端に位置している場合は、注目 UE が存在している自セル内の DA における受信信号電力よりも周辺セル内の DA における受信信号電力の方が大きくなる場合がある。したがって、このような場合は自セル内の DA に加えて周辺セル内の DA をもダイバーシチプランチとして使用することでさらに大きな空間ダイバーシチ利得が得られると考えられる。図 2 にマクロセル間連携分散アンテナ SC-STBC ダイバーシチの動作を示す。マクロセル間連携を導入する場合は、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候補とする。そして計 7×7 ダイバーシチプランチ候補の中から N_r 本の DA を選択して SC-STBC ダイバーシチ伝送を行う。なお本稿では初期検討として、CCI 電力を考慮せず、瞬時受信信号電力の降べき順に DA を選択するものとしている。

3. SC-STBC ダイバーシチ

以降、シンボル間隔 T_s の離散時間等価低域表現を用いる。また注目セル内の伝送に着目し、 $N_t=2$ の場合に着目して述べる。

3.1. 送受信信号表現

本稿では、SC-STBC ダイバーシチを用いる上りリンク伝送を仮定している。図 3 に SC-STBC ダイバーシチにおける送受信機構成を示す。UE 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 N_c ポイント高速フーリエ変換 (FFT) を適用して周波数領域信号に変換する。そして周波数領域において STBC 符号化を行い、 $N_t \times Q$ ブロックからなる STBC 符号化送信信号を生成する。第 j ($j=0, \dots, J-1$) 周波数領域送信信号ブロックを $\{D_j(k): k=0, \dots, N_c-1\}$ とすると、第 q STBC 符号化送信信号ベクトル $\mathbf{S}_q(k) = [S_q(0, k), \dots, S_q(N_t-1, k)]^T$ は次式で与えられる。

$$(\mathbf{S}_0(k) \quad \mathbf{S}_1(k)) = \begin{pmatrix} D_0(k) & D_1(k) \\ -D_1^*(k) & D_0^*(k) \end{pmatrix} \quad (3)$$

その後、UE は STBC 符号化送信信号ブロックに対して逆 FFT (IFFT) を適用して時間領域信号に変換する。最後に、ブロック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 本のアンテナから DA に向けて信号を送信する。

DA に接続されている BBU では、受信信号から CP を除去した後、 N_c ポイント FFT を適用して周波数領域受信信号に変換する。第 n_r 受信 DA における第 q 周波数領域受信信号を $\{R_q(n_r, k): k=0, \dots, N_c-1, n_r=0, \dots, N_r-1\}$ とすると、周波数領域受信信号ベクトル $\mathbf{R}_q(k) = [R_q(0, k), \dots, R_q(N_r-1, k)]^T$ は次式で表される。

$$\mathbf{R}_q(k) = \sqrt{\frac{2\hat{P}_t}{N_t}} \mathbf{H}(k) \mathbf{S}_q(k) + \boldsymbol{\Pi}_q(k) + \mathbf{N}_q(k) \quad (4)$$

ただし $\mathbf{H}(k)$ は伝搬損失およびシャドウイング損失を含む $N_r \times N_t$ 周波数領域チャネル行列である。第 n_t UE アンテナ-第 n_r DA 間のチャネルの伝達関数を $H(n_r, n_t, k)$ とするとき、 $\mathbf{H}(k) = [\mathbf{H}(0, k), \dots, \mathbf{H}(N_t - 1, k)]^T$ および $\mathbf{H}(n_t, k) = [H(0, n_t, k), \dots, H(N_r - 1, n_t, k)]^T$ で表される。また $\Pi_q(k) = [\Pi_q(0, k), \dots, \Pi_q(N_r - 1, k)]^T$ は CCI ベクトルであり、 $\Pi_q(n_r, k)$ は第 n_r DA における分散 $\sigma_{CCI}^2(n_r)$ の CCI である。 $\mathbf{N}_q(k) = [N_q(0, k), \dots, N_q(N_r - 1, k)]^T$ は雑音ベクトルであり、 $N_q(n_r, k)$ は零平均分散 $2N_0/T_s$ の加法性白色ガウス雑音 (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 BBU は受信信号に対して受信周波数領域等化 (FDE) を行う。受信 FDE 後の第 q 周波数領域受信信号ベクトル $\hat{\mathbf{R}}_q(k) = [\hat{R}_q(0, k), \dots, \hat{R}_q(N_t - 1, k)]^T$ は次式で与えられる。

$$\hat{\mathbf{R}}_q(k) = \mathbf{W}(k) \mathbf{R}_q(k) \quad (5)$$

ただし $\mathbf{W}(k) = [\mathbf{W}^T(0, k), \dots, \mathbf{W}^T(N_t - 1, k)]^T$ は $N_t \times N_r$ 受信 FDE 重み行列であり、 $\mathbf{W}(n_t, k) = [W(n_t, 0, k), \dots, W(n_t, N_r - 1, k)]^T$ である。本稿では、受信 FDE 重みは最小平均二乗誤差 (MMSE) 規範によって決定されるものとし、次式で与えられる。

$$W(n_t, n_r, k) = \frac{\tilde{H}^*(n_r, n_t, k)}{\sum_{n_r=0}^{N_r-1} \sum_{n_t=0}^{N_t-1} \frac{|\tilde{H}(n_r, n_t, k)|^2}{\gamma^{-1}(n_r)} + 1} \quad (6)$$

ここで $\gamma(n_r)$ は第 n_r DA における正規化送信信号電力対 (CCI+雑音) 電力比であり、 $\gamma(n_r) = \hat{P}_t / (\sigma_{CCI}^2(n_r) + N_0 \cdot N_r)$ で与えられる。ただし、 $N = N_0/T_s$ は雑音電力である。その後、受信 FDE 後の受信信号に対して STBC 復号を行う。STBC 復号後の第 j 周波数領域受信信号 $\{\hat{D}_j(k) : k=0, \dots, N_c - 1, j=0, \dots, J-1\}$ は次式で表される。

$$\begin{cases} \hat{D}_0(k) = \hat{R}_0(0, k) + \hat{R}_1^*(1, k) \\ \hat{D}_1(k) = \hat{R}_0(1, k) - \hat{R}_1^*(0, k) \end{cases} \quad (7)$$

最後に STBC 復号後の周波数領域受信信号に対して N_c ポイント IFFT を適用して時間領域信号変換した後、データ復調を行う。

3.2. 上りリンク容量

SC-STBC ダイバーシチ传送では、周波数ダイバーシチ効果と空間ダイバーシチ効果が得られるものの、STBC 復号後の受信信号は依然として雑音だけでなく残留符号干渉 (ISI) にも影響される。チャネルが与えられた場合における条件付き瞬時受信信号対 (干渉+雑音) 電力比 (SINR) Γ は次式で与えられる。

$$\Gamma = \frac{2\hat{P}_t \left| \frac{1}{N_c} \sum_{k=0}^{N_c-1} \sum_{n_r=0}^{N_r-1} \mathbf{W}(n_r, k) \mathbf{H}(n_r, k) \right|^2}{\hat{P}_t \left[\begin{array}{l} \left| \frac{1}{N_c} \sum_{k=0}^{N_c-1} \sum_{n_r=0}^{N_r-1} \mathbf{W}(n_r, k) \mathbf{H}(n_r, k) \right|^2 \\ - \left| \frac{1}{N_c} \sum_{k=0}^{N_c-1} \sum_{n_r=0}^{N_r-1} \mathbf{W}(n_r, k) \mathbf{H}(n_r, k) \right|^2 \\ + \frac{1}{N_c} \sum_{k=0}^{N_c-1} \sum_{n_r=0}^{N_r-1} \sum_{n_t=0}^{N_t-1} |W(n_t, n_r, k)|^2 (\sigma_{CCI}^2(n_r) + N_t \cdot N_r) \end{array} \right]} \quad (8)$$

右辺分母第 1 項が残留 ISI 成分であり、第 2 項が (CCI+雑音) 成分である。本稿では、上式で与えられる STBC 復号後の受信 SINR とシャノンの容量式[1]に基づいて上りリンク容量を求める。上りリンク容量 $C(\text{bps}/\text{Hz})$ は次式で与えられる。

$$C = \log_2(1 + \Gamma) \quad (9)$$

4. 計算機シミュレーション

マクロセル間連携分散アンテナ SC-STBC ダイバーシチを用いる小セルネットワークにおける上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。伝搬損失指数 α およびシャドウイ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正規化送信電力対雑音電力比 \hat{P}_t/N は $\hat{P}_t/N = -5 \text{ dB}$ としており、チャネル推定は理想的に行えるものと仮定している。上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 5% 値を 5% アウテージ上りリンク容量とよぶ。

4.1. 上りリンク容量の CDF 分布

図 4 にマクロセル間連携分散アンテナ SC-STBC ダイバーシチを用いる小セルネットワークにおける上りリンク容量の CDF 分布を示す。ただし、受信ダイバーシチアンテナ数は $N_r = 4$ としている。また比較のためマクロセル間連携を行わない小セルネットワークにおける分布および従来マクロセルネットワークにおける分布も同様に図 4 に示す。さらに各種ネットワークにおいて CCI がない場合における CDF 分布も同様に図 4 に示す。これらの分布はスケジューリングなどの干渉回避技術を用いた時の上りリンク容量の上界を示している。図 4 より、小セルネットワークは従来マクロセルネットワークよりも常に優れた上りリンク容量を達成できることが分かる。たとえばマクロセル間連携を行わない小セルネットワークにおいても従来マクロセルネットワークと比較して約 10 倍の 5% アウテージ上りリンク容量を達成できる。これは DA を用いる小セルネットワークが伝搬損失、シャドウイング損失および周波数選択性フェージングの影響を軽減でき、より高い受信 SINR を達成できるためである。また図 4 より、マクロセル間連携を導入することでマクロセル間連携を導入しない場合よりも高い上りリンク容量を達成できることが分かる。これは注目 UE が存在している自セル内の分散アンテナだけでなく周辺セル内の分散アンテナをも受信ダイバーシチブランチとして用いることで、より大きな空間ダイバーシチ利得が得られるためである。

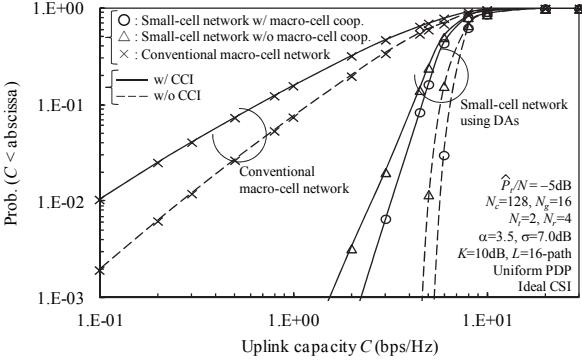


図 4 上りリンク容量の CDF 分布

4.2. 受信ダイバーシチアンテナ本数の影響

図 5 に受信ダイバーシチアンテナ本数 N_r 対 5% アウテージ上りリンク容量特性を示す。また各種ネットワークにおいて CCI がない場合における特性も同様に図 5 に示す。図 5 より、受信ダイバーシチアンテナ本数が $N_r=1$ の場合についてはマクロセル間連携を導入することで 5% アウテージ上りリンク容量がむしろ劣化してしまうことが分かる。本稿では初期検討として、CCI を考慮せず瞬時受信信号電力のみに着目して DA 選択を行っている。そのため、 $N_r=1$ の場合は周辺セルの DA を用いることで CCI が増大してしまい、5% アウテージ上りリンク容量が劣化してしまう。一方で受信ダイバーシチアンテナ本数が 2 本以上の場合は、空間ダイバーシチ効果により CCI の影響を軽減できるため、マクロセル間連携を導入した方がより高い 5% アウテージ上りリンク容量を達成している。また図 5 より、マクロセル間連携を導入しない小セルネットワークでは、受信ダイバーシチアンテナ本数を 3 本以上大きくしても 5% アウテージ上りリンク容量があまり改善しないことが分かる。この理由については以下のように考えられる。図 1 に示すように、DA を用いる小セルネットワークでは DA がマクロセル内に分散配置している。そのため、受信ダイバーシチアンテナ本数を増やすにつれて、より遠方の DA を使用することとなる。UE から離れた DA では受信 SINR が非常に小さいため、受信ダイバーシチアンテナとして使用したとしても得られる空間ダイバーシチ利得は小さい。一方でマクロセル間連携を導入した場合は受信ダイバーシチアンテナ本数を増やすことで上りリンク容量をさらに改善できる。たとえば受信ダイバーシチアンテナ本数が $N_r=7$ の場合、マクロセル間連携を導入することでマクロセル間連携しない場合と比較して 5% アウテージ上りリンク容量を約 20% 向上できる。

図 5 より、マクロセル間連携を導入する場合においても CCI が加わることで CCI が加わらない環境と比較して 5% アウテージ上りリンク容量が低下していることが分かる。具体的には CCI が加わることで CCI が加わらない環境と比較して 5% アウテージ上りリンク容量が約 0.7 倍に低下している。このことは他の干渉回避技術を導入することで 5% アウテージ上りリンク容量を最大で約 1.4 倍向上できることを意味している。したがって DA を用いる小セルネットワークに適した干渉回避技術について今後検討する必要がある。

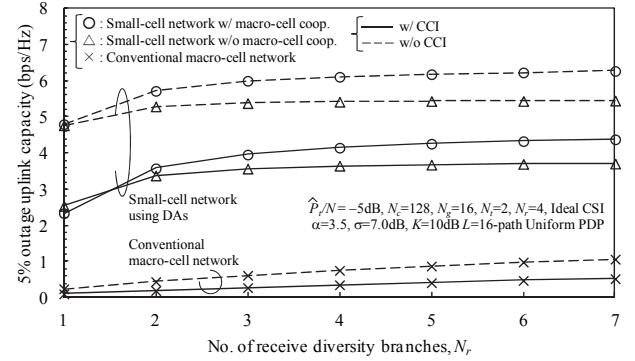


図 5 受信ダイバーシチアンテナ本数の影響

4.3. 局所平均上りリンク容量の空間分布

図 6 に注目 UE の位置が与えられたときの局所平均上りリンク容量の空間分布を示す。ただし、受信ダイバーシチアンテナ本数は $N_r=4$ としている。図 6 より、DA を用いる小セルネットワークは従来マクロセルネットワークと比較してマクロセル端における局所平均上りリンク容量を向上できることが分かる。具体的には、従来マクロセルネットワークにおけるマクロセル端 $((x,y)=(0.5, 0.86)$ の点) での局所平均上りリンク容量は 1.59bps/Hz であるのに対し、マクロセル間連携を用いない小セルネットワークにおけるマクロセル端 $((x,y)=(0.75, 0.65)$ の点) での局所平均上りリンク容量は 3.72bps/Hz であり、約 2.4 倍のマクロセル端上りリンク容量を達成している。ただし、マクロセル間連携を導入しない場合は、マクロセル中央付近と比較するとマクロセル端における上りリンク容量が劣化している。具体的にはマクロセル中央付近の小セル端 $((x,y)=(0.18, 0.32)$ の点) における局所平均上りリンク容量は 5.36bps/Hz であるのに対し、マクロセル端における上りリンク容量は 3.72bps/Hz であり、約 0.7 倍に低下している。これは UE がマクロセル端に位置している場合、自セル内のいくつかの DA は UE の遠方に位置しており、その DA を用いたとしても空間ダイバーシチ利得がほとんど得られないためである。

図 6 より、マクロセル間連携を導入することで導入しない場合よりもマクロセル端における局所平均上りリンク容量を向上できることが分かる。具体的には、マクロセル間連携を導入した場合におけるマクロセル端での局所平均上りリンク容量は 5.08bps/Hz であり、マクロセル間連携を導入しない場合の約 1.4 倍のマクロセル端上りリンク容量を達成できる。これは UE 近傍に存在している周辺セル内の DA を用いることで、UE がマクロセル端に位置している場合でも大きな空間ダイバーシチ利得が得られるためである。またマクロセル間連携を導入した場合におけるマクロセル中央付近の小セル端での局所平均上りリンク容量は 5.44bps/Hz であり、マクロセル端における上りリンク容量と大きな差はない。したがって、マクロセル間連携を導入することで、マクロセル全域において一様な上りリンク容量を達成できるといえる。

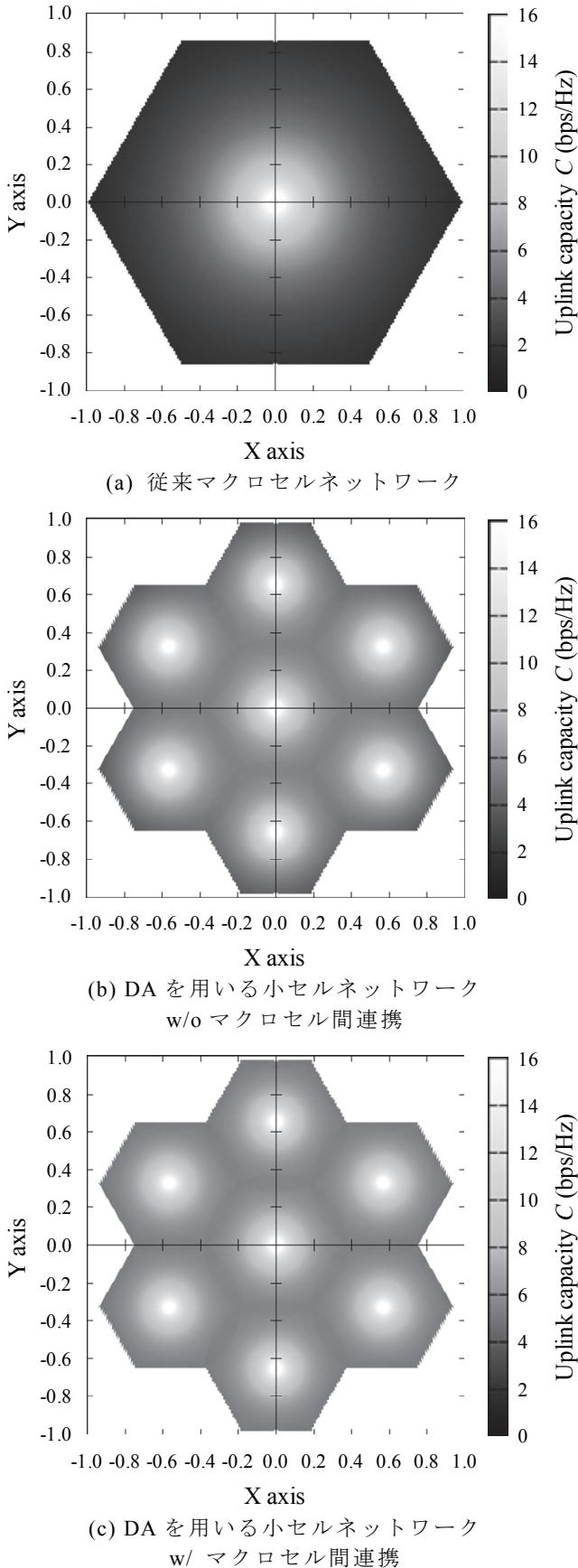


図 6 局所平均上りリンク容量の空間分布

5. まとめ

本稿では分散アンテナ SC-STBC ダイバーシチを用いる小セルネットワークへのマクロセル間連携の導入効果について検討した。マクロセル間連携分散アンテナ SC-STBC ダイバーシチを用いる小セルネットワークにおける上りリンク容量を計算機シミュレーションにより求め、マクロセル間連携を導入してマクロセル境界を無くすことで、マクロセル端における局所平均上りリンク容量を約 1.4 倍に向上できることを明らかにした。なお本稿では初期検討として、干渉回避技術は一切用いない場合を想定した。そこで今後 DA を用いる小セルネットワークに適したスケジューリングなどの干渉回避技術について検討する必要がある。

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] J. G. Proakis and M. Salehi, *Digital communications*, 5th ed., McGraw-Hill, 2008.
- [2] F. Adachi, W. Peng, T. Obara, T. Yamamoto, R. Matsukawa and M. Nakada, “Distributed antenna network for gigabit wireless access,” International Journal of Electronics and Communications (AEUE), Elsevier, vol. 66, no. 8, pp. 605-622, Aug. 2012.
- [3] F. Adachi, W. Peng, T. Obara, T. Yamamoto, R. Matsukawa and M. Nakada, “Distributed antenna network and its related wireless techniques,” Proc. the 7th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC2011), Istanbul, Turkey, July 2011.
- [4] 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.
- [5] V. Tarokh, H. Jafarkhani and A. R. Calderbank, “Space-time block coding for wireless communications: performance results,” IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. 17, no. 3, pp. 451-460, Mar. 1999.
- [6] K. Takeda, T. Itagaki, and F. Adachi, “Applization 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.
- [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] R. Matsukawa, T. Obara, K. Takeda and F. Adachi, “Downlink throughput performance of distributed antenna network using transmit/receive diversity,” Proc. 2011 IEEE 74th Vehicular Technology Conference (VTC2011-fall), San Francisco, United States, Setp. 2011.