

STBC 送信ダイバーシチを用いた 大規模分散アンテナ小セルネットワークにおける スケジューリングに関する一検討

齋藤 智之 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 2-1-1

E-mail: saito.tmm@riec.tohoku.ac.jp, adachi@ecei.tohoku.ac.jp

あらまし 第5世代(5G)移動無線システムの実現に向けて筆者らは、マクロセル内に多数の分散アンテナを配置し、それらを協調して利用する分散アンテナ協調信号伝送(Cooperative distributed antenna transmission, CDAT)を提唱している。移動無線システムでは、マクロセル内に多数のアクティブユーザが存在し、各ユーザの受信電力やCCI電力はユーザの位置に依存して複雑に変動する。そこで、ユーザ間の公平性を確保しつつ、無線帯域を有効に活用するにはスケジューリング(Proportional Fair (PF), Round-robin (RR), Max-SNR)を用いることが必須である。

筆者らはこれまで、任意の数の分散アンテナを用いて大きな空間ダイバーシチ次数を確保できる時空間ブロック符号化(STBC)ダイバーシチを適用したCDATにおけるスケジューリングの検討を行ってきた。広帯域無線伝送のような比較的周波数選択性が強いチャネル環境では、各ユーザのリソースブロック内平均フェージングチャネル利得の差がほとんど無くなることからマルチユーザダイバーシチ利得が低下し、その結果、PFスケジューリングとRRスケジュールの差が僅かになることを示した。ところでリンク容量の向上には、マクロセル内の分散アンテナ本数の増加が効果的である。しかしながら、7本以上の分散アンテナを用いる場合についての検討は十分ではなかった。

そこで本報告では、7本以上の分散アンテナを用いる大規模分散アンテナ小セルネットワークについての検討結果を報告する。計算機シミュレーションにより、平均合計リンク容量、ユーザリンク容量およびJainの公平性指標(FI)との関係に及ぼす分散アンテナ本数の影響について明らかにしている。また、分散アンテナの配置法(規則的配置およびランダム配置)の影響についても考察している。

キーワード 分散アンテナ協調伝送, 時空間ブロック符号化, スケジューリング

Study on Scheduling for Large-Scale Distributed Antenna Small-Cell Network Using STBC Transmit Diversity

Tomoyuki SAITO and Fumiyuki ADACHI

Research Organization of Electrical Communication, Tohoku University

2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai, 980-8577 Japan

E-mail: saito.tmm@riec.tohoku.ac.jp, adachi@ecei.tohoku.ac.jp

Abstract To realize the fifth generation (5G) mobile communication systems, we proposed cooperative distributed antenna transmission (CDAT). In the mobile communication systems, many active user are existed in macro-cell, and the received power and the CCI power of each user is varied according to user's position. Therefore, the user scheduling scheme (Proportional Fair (PF), Round-robin (RR), Max-SNR) is required for effectively utilizing a radio communication band while ensuring the fairness of each user. We have been studying user scheduling scheme for CDAT using space-time block coded (STBC) diversity that can obtain large spatial diversity order while using arbitrary distributed antennas. We have found in our previous work that as the frequency selectivity of the channel gets stronger, the differences in averaged channel gains, due to multipath fading, among active users is substantially reduced and therefore even the RR scheduling provides the link capacity similar to the PF scheduling. To improve the link capacity, increasing number of distributed antennas in macro-cell is effective. However, small-cell network using more than 7 distributed antennas has not been sufficiently examined.

In this paper, we report the result of studies on large-scale distributed antenna small-cell network using seven or more distributed antennas. We evaluate, by computer simulation, the relationship of average sum link capacity, user link capacity, and Jain's fairness index. We discuss the impact of number of distributed antennas and the impact of distributed antenna deployment (uniform and random).

Keywords cooperative distributed antenna transmission, space-time block coding, scheduling

1. まえがき

第5世代移動無線通信システムでは、通信エリア全体で広帯域伝送の実現が求められている。しかしながら、広帯域無線チャネルは伝搬損失、シャドウイング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してしまう[1]。これらの問題を克服するために、マクロセル内に多数の分散アンテナを配置し、それらを協調して利用する分散アンテナ協調伝送 (Cooperative distributed antenna transmission, CDAT) が近年注目を集めている[2,3]。CDATでは、ユーザ端末 (UE) 近傍の分散アンテナ (DA) を用いることにより伝搬損失とシャドウイング損失の影響を低減でき、通信マクロセルエリア全体に亘って優れた伝送品質を達成できる。CDATにおける有望な技術の一つとして、2本以上の分散アンテナを用いる時空間ブロック符号化 (STBC) ダイバーシチ [4,5,6]が知られている。

ところで、利用可能な無線帯域は限られているため、マクロセル内に存在する多数のアクティブユーザの公平性を確保しつつ、無線帯域を有効に利用するためにはマルチユーザスケジューリングの実施が必須である。筆者らはこれまで、広帯域無線伝送のような周波数選択性が強いチャネル環境や STBC ダイバーシチを用いた CDAT のように大きな空間ダイバーシチが得られるチャネル環境では、各ユーザのリソースブロック内平均フェージングチャネル利得の差がほとんど無くなることからマルチユーザダイバーシチ利得が低下し、その結果、PF スケジューリングにより得られるリンク容量の向上利得が低下することを示した[7,8]。ところでリンク容量の向上には、マクロセル内の分散アンテナ本数を増やすことが効果的であるが、7本以上の分散アンテナを用いた場合の検討は不十分であった。

本稿では、計算機シミュレーションにより、平均合計リンク容量、ユーザリンク容量と Jain の公平性指標 (FI)[9]との関係を求め、マクロセル内の分散アンテナ本数が各スケジューリング規範に及ぼす影響を定量的に評価している。また、アンテナ配置法 (規則的配置、ランダム配置) の影響についても評価している。その結果、マクロセル内の分散アンテナ本数を増加させることで、マクロセル内の平均合計リンク容量と FI を向上できることと、簡易な処理の RR スケジューリングでも PF スケジューリングと同程度の平均合計リンク容量と FI を得られることを明らかにしている。

本稿の構成は以下の通りである。第2章において小セルネットワークモデルについて述べ、第3章にて伝送系について述べる。第4章でマルチユーザスケジューリングの動作原理を示し、第5章でチャネルモデルを述べたのち計算機シミュレーション結果を示す。第6章で結論を述べる。

2. 小セルネットワークモデル

本稿では、周辺マクロセルからの同一チャネル間干渉 (CCI) が存在するマルチセル環境を仮定する。図1に DA を用いた小セルネットワークモデル ($N_{\text{macro}}=37$, 規則的 DA 配置) を示す。中央マクロセル (#0) を注目マクロセルとし、その周辺に6つのマクロセル (#1~#6) が存在するものと仮定している。小セルネットワークでは、ひとつのマクロ基地局 (MBS) に有線接

続された N_{macro} 本の DA がマクロセル内に配置されており、各 DA は半径 R' の小セルをカバーしている。UE は N_{ue} 本のアンテナを搭載しているものとし、各 UE はマクロセル内の N_{macro} 本の DA から N_{mbs} 本の DA を送信ダイバーシチブランチとして選択して、STBC ダイバーシチ OFDM 下りリンク伝送を行う。

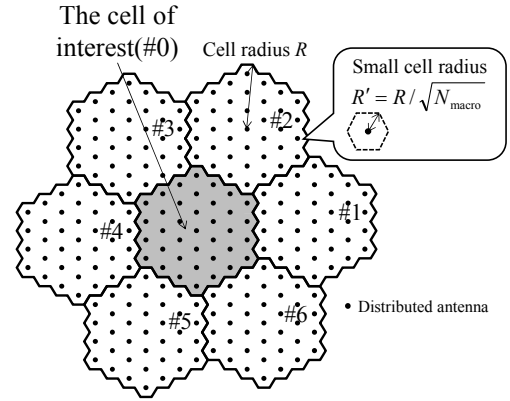


図1 規則的 DA 配置を用いる小セルネットワークモデル ($N_{\text{macro}}=37$)

3. STBC ダイバーシチを用いる OFDM 下りリンク伝送系

本稿では、FDE を用いるため周波数領域信号表現を用いる。 N_c 本のサブキャリアを用いて伝送するものとする。全周波数帯域を N_c/N_{RB} のサブキャリアからなる N_{RB} 個のリソースブロックに分割し、リソースブロック単位でマルチユーザスケジューリングを行うものと仮定している。以降、スケジューラにて第 n ($n=0 \sim N_{\text{RB}}-1$) リソースブロックに第 u ユーザが割り当てられたものとした伝送系について述べる。

3.1. 送信 FDE を用いる STBC ダイバーシチ

図2に、送信 FDE を用いる STBC ダイバーシチの送受信機構成を示す。送信機 (MBS) では、 N_c/N_{RB} 個のデータシンボルからなる J 個の信号ブロックに対して STBC 符号化を適用して $N_{\text{ue}} \times Q$ 行列の STBC 符号化信号行列 $\mathbf{X}(k)$ を生成する。第 n リソースブロックの第 j ($j=0 \sim J-1$) 送信シンボルブロックを $\{D_{n,j}(k)\}$; $k=n(N_c/N_{\text{RB}}) \sim (n+1)(N_c/N_{\text{RB}})-1$ とすると、STBC 符号化信号行列 $\mathbf{X}(k)$ は次式で与えられる。

$$\mathbf{X}(k) = \begin{bmatrix} D_{n,0}(k) & -D_{n,1}^*(k) \\ D_{n,1}(k) & D_{n,0}^*(k) \end{bmatrix} \quad (1)$$

次いで N_{mbs} 行 $\times N_{\text{ue}}$ 列の送信 FDE 重み $\mathbf{W}_{\text{mrt}}(k)$ を乗算して、 $N_{\text{mbs}} \times Q$ 送信信号行列 $\mathbf{S}(k)$ を生成する。送信 FDE 重みは送信シンボルと STBC 復号後の受信シンボルの受信信号電力対雑音電力比 (SNR) を最大化する送信 MRT-FDE を用い、次式で表される。

$$\mathbf{W}_{\text{mrt}}(k) = \mathbf{A}\mathbf{H}^H(k) \quad (2)$$

ここで、 \mathbf{A} と $\mathbf{H}(k)$ はそれぞれ、次式で与えられる電力正規化係数と N_{ue} 行 $\times N_{\text{mbs}}$ 列の周波数領域チャネル行列である。ここで、 $[\cdot]^H$ はエルミート転置を表す。

$$A = \left(\frac{1}{N_c/N_{RB}} \sum_{k=n(N_c/N_{RB})}^{(n+1)(N_c/N_{RB})-1} \sum_{n_{mbs}=0}^{N_{mbs}-1} \sum_{n_{ue}=0}^{N_{ue}-1} |H(k; n_{ue}, n_{mbs})|^2 \right)^{-1/2} \quad (3)$$

$$\mathbf{H}(k) = \begin{bmatrix} H(k; 0, 0) & \cdots & H(k; 0, N_{mbs}-1) \\ \vdots & & \vdots \\ H(k; N_{ue}-1, 0) & \cdots & H(k; N_{ue}-1, N_{mbs}-1) \end{bmatrix} \quad (4)$$

MRT-FDE 重みを掛けた後の送信信号行列 $\mathbf{S}(k)=[S(k; n_{mbs}, q); n_{mbs}=0 \sim N_{mbs}-1, q=0 \sim Q-1]^T$ は次式で与えられる。

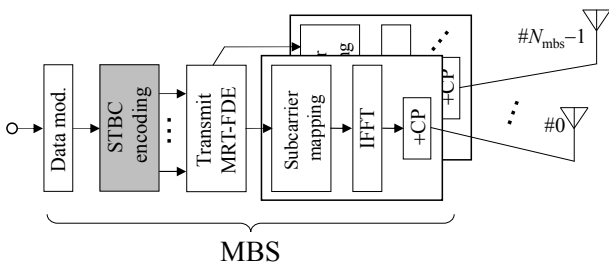
$$\mathbf{S}(k) = \sqrt{\frac{2E_s}{T_s}} \mathbf{W}_{mrt}(k) \mathbf{X}(k) \quad (5)$$

ここで E_s および T_s は送信データシンボルエネルギーおよびデータシンボル長をそれぞれ表している。その後、サブキャリアマッピングを行い、 N_{RB} 個のリソースブロックを全周波数帯域にマッピングした信号行列に対して N_c ポイントの IFFT を適用し、OFDM シンボルのガード区間に **Cyclic Prefix (CP)** を挿入した後、 N_{mbs} 本の分散アンテナから信号を送信する。

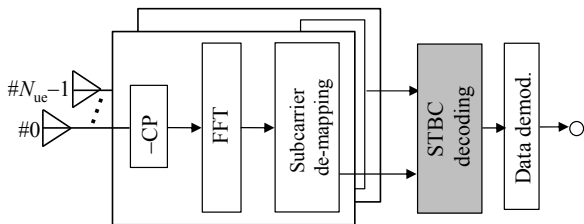
各 UE では、受信信号から CP 除去後、 N_c ポイントの FFT を適用して、サブキャリアデマッピングを行い、割り当てられた第 n リソースブロックの信号を取り出す。サブキャリアデマッピング後の受信信号は、次式のように N_{ue} 行 \times Q 列の行列 $\mathbf{R}(k)=\{R(k; n_{ue}, q); n_{ue}=0 \sim N_{ue}-1, q=0 \sim Q-1\}$ として表現できる。

$$\begin{aligned} \mathbf{R}(k) &= \mathbf{H}(k) \mathbf{S}(k) + \mathbf{N}(k) \\ &= \sqrt{\frac{2E_s}{T_s}} A(\mathbf{H}(k) \mathbf{H}^H(k)) \mathbf{X}(k) + \mathbf{N}(k) \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、 $\mathbf{N}(k)=\{N(k; n_{ue}, q); k=0 \sim N_{ue}-1, q=0 \sim Q-1\}$ は第 N_{ue} 行 \times Q 列の熱雑音行列であり、各要素はゼロ平均で分散 $2N_0/T_s$ を持つ独立な複素ガウス変数である。次いで STBC 復号を行い、最後にデータ復調を行う。



(a) 送信機 (MBS 側)



(b) 受信機 (UE 側)

図 2 送受信機構成

3.2. リンク容量

本稿では、STBC 復号後の受信信号対 (雑音+CCI) 電力比 (SINR) とシャノンの容量式[1]に基づいて OFDM 下りリンク容量を求める。総サブキャリア数 N_c に対して周波数分割多重 (Frequency division multi-access, FDMA) によって $U (=N_{RB})$ 台の UE を多重し、各 UE には N_c/N_{RB} 本のサブキャリアが割り当てられているものとする。一般性を失うことなく、第 n リソースブロックには $k=n(N_c/N_{RB}) \sim (n+1)(N_c/N_{RB})-1$ 番目の N_c/N_{RB} 本のサブキャリアを割り当てるものとする。第 n リソースブロックを割り当てられた時の第 u UE の OFDM 下りリンク容量 $C_u(n)$ (bps/Hz) は次式により計算できる。

$$C_u(n) = \frac{1}{N_c/N_{RB}} \sum_{k=n(N_c/N_{RB})}^{(n+1)(N_c/N_{RB})-1} \log_2(1 + \gamma_u(k)) \quad (7)$$

ここで $\gamma_u(k)$ は第 u UE の STBC 復号後の第 k サブキャリアの瞬時 SINR であり、次式で表される[6]。

$$\gamma_u(k) = \frac{E_s}{N_0} \frac{|\hat{H}(k)|^2}{\mu_u^{\text{noise+CCI}}} \quad (8)$$

ここで、 E_s/N_0 は正規化送信シンボルエネルギー対熱雑音電力スペクトル密度比である。 $\hat{H}(k)$ 、 $\mu_u^{\text{noise+CCI}}$ はそれぞれ、下りリンクチャネル利得と第 u UE が受ける下りリンク CCI 電力スペクトル密度であり、次式で与えられる。

$$\hat{H}(k) = \frac{\sum_{n_{ue}=0}^{N_{ue}-1} \sum_{n_{mbs}=0}^{N_{mbs}-1} |H(k; n_{ue}, n_{mbs})|^2}{\sqrt{\frac{1}{N_c/N_{RB}} \sum_{k=u(N_c/N_{RB})}^{(u+1)(N_c/N_{RB})-1} \sum_{n_{mbs}=0}^{N_{mbs}-1} \sum_{n_{ue}=0}^{N_{ue}-1} |H(k; n_{ue}, n_{mbs})|^2}} \quad (9)$$

$$\mu_u^{\text{noise+CCI}} = 1 + \frac{I_0(u)}{N_0} \quad (10)$$

ここで、 $I_0(u)$ は注目セル (#0) の第 u UE が受ける CCI 電力スペクトル密度である。

4. マルチユーザスケジューリング

本稿では、Proportional Fair (PF) 規範、Max-SNR 規範および Round-Robin (RR) 規範を用いた 3 つのスケジューリング戦略[10]について検討している

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アクティブユーザ U_{act} 台から $U (=N_{RB})$ 台を第 n リソースブロック ($n=0 \sim N_{RB}-1$) 毎に排他的に選択する。したがって、同一タイムスロット内では、各ユーザに最大 1 つのリソースブロックが割り当てられる。また、第 t タイムスロットの第 n リソースブロックの第 u ユーザのリンク容量は式(7)を用いて次式のように表せる。

$$C_u(n, t) = a_u(n, t) \cdot C_u(n) \quad (11)$$

ここで、 $a_u(n, t)$ は第 u ユーザが第 t タイムスロットの第 n リソースブロックを割り当てられたかを示す変数

であり、割り当てられた場合は 1、割り当てられなかった場合は 0 となる。

4.1. PF スケジューリング

PF スケジューリングでは、第 t タイムスロットにおいて第 n リソースブロックを割り当てた時に、次式が最大となる第 u ユーザに第 n リソースブロックを割り当てる。この時のユーザインデックス $u^*(n,t)$ は次式で与えられる。

$$u^*(n,t) = \arg \max_{0 \leq u \leq U_{\text{act}}-1} \frac{\hat{C}_u(n,t)}{\bar{C}_u(t-1)} \quad (12)$$

ここで $\hat{C}_u(n,t)$ は第 u ユーザが第 t タイムスロットの第 n リソースブロックを割り当てられた場合に与えられる瞬時ユーザリンク容量の期待値を示し、受信電力対雑音電力比 (SNR) で与えられるチャンネル容量に基づいて次式のように表せる。

$$\hat{C}_u(n,t) = \frac{1}{N_c/N_{\text{RB}}} \sum_{k=n(N_c/N_{\text{RB}})}^{(n+1)(N_c/N_{\text{RB}})-1} \log_2 \left(1 + \frac{E_s}{N_0} |\hat{H}(k)|^2 \right) \quad (13)$$

また、 $\bar{C}_u(t-1)$ は第 u ユーザの第 $t-1$ タイムスロットまでの平均ユーザリンク容量であり、次式で与えられる。

$$\bar{C}_u(t) = \begin{cases} \left(1 - \frac{1}{T_{\text{PF}}} \right) \bar{C}_u(t-1) & u \neq u^* \\ \left(1 - \frac{1}{T_{\text{PF}}} \right) \bar{C}_u(t-1) + \frac{1}{T_{\text{PF}}} C_u(t) & u = u^* \end{cases} \quad (14)$$

ここで T_{PF} , $C_u(t)$ はそれぞれ平均化区間と式(11)に基づいた第 t タイムスロットにおける瞬時ユーザリンク容量である。

4.2. Max-SNR スケジューリング

Max-SNR スケジューリングでは、各タイムスロットにおける瞬時リンク容量が最大となるユーザをスケジューリングする。第 t タイムスロットにおける第 n リソースブロックに割り当てられるユーザインデックス $u^*(n,t)$ は次式で与えられる。

$$u^*(n,t) = \arg \max_{0 \leq u \leq U_{\text{act}}-1} \hat{C}_u(n,t) \quad (15)$$

4.3. RR スケジューリング

RR スケジューリングでは、ユーザの瞬時チャンネル状態を考慮することなく、各ユーザに順番にリソースブロックを割り当てていくスケジューリング戦略である。各ユーザに与えられる通信機会は公平になるが、チャンネル状態の悪いユーザにも無線リソースを割り当てるため、一般的には各ユーザが得られる通信リンク容量は公平とはならない。しかしながら、広帯域無線通信のような周波数選択性が強い伝搬環境や STBC ダイバーシチを用いた CDAT のように大きな空間ダイバーシチが得られる環境の場合、各ユーザのリソースブ

ロック内平均フェージングチャンネル利得の差が小さくなるため、PF スケジューリングと比べても遜色のない公平性と通信リンク容量を達成できるものと期待できる。

5. 計算機シミュレーション

CDAT を用いた小セルネットワークの 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、各スケジューリング規範の平均合計リンク容量、UE リンク容量、FI の関係を求めた。

広帯域無線伝搬チャンネルは伝搬損失、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 [1]。DA—UE 間距離が小さい場合は見通し環境となり、フェージングチャンネルは周波数選択性仲上・ライスフェージングによって特徴づけられると考えられる。第 n_{mbs} DA—第 u UE 間距離 ($d_{u,n_{\text{mbs}}}$) が小セル半径以下の場合 ($d_{u,n_{\text{mbs}}} \leq R'$) は、DA—UE 間のチャンネルは周波数選択性仲上・ライスフェージングによって特徴づけられるものとし、第 n_{mbs} DA—第 u UE 間距離が小セル半径より大きい場合 ($d_{u,n_{\text{mbs}}} > R'$) は、DA—UE 間のチャン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する。第 n_{mbs} DA—第 n_{ue} UE アンテナ間のチャンネルインパルス応答 $h(n_{\text{ue}}, n_{\text{mbs}}, \tau)$ は次式で表される。

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

ここで α は伝搬損失指数であり、 $\eta_{n_{\text{ue}}, n_{\text{mbs}}}$ は第 n_{mbs} DA—第 u UE 間のシャドウイング損失 (dB) 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。 $\theta(n_{\text{ue}}, n_{\text{mbs}})$ は第 n_{mbs} DA—第 n_{ue} UE アンテナ間チャンネルの主要波の位相であり、 $\tau_{n_{\text{ue}}, n_{\text{mbs}}}$ は主要波の遅延時間である。また、 $\zeta_{n_{\text{ue}}, n_{\text{mbs}}}(l)$ は第 n_{mbs} DA—第 n_{ue} UE アンテナ間チャンネルの第 l 遅延パスの複素パス利得であり、 $\tilde{\tau}_{n_{\text{ue}}, n_{\text{mbs}}}(l)$ は第 l 遅延パスの遅延時間である。

シミュレーション諸元を表 1 に示す。FFT/IFFT ブロックサイズ N_c および CP 長 N_g はそれぞれ $N_c=1024$ および $N_g=16$ とし、マクロセル内に配置する DA 本数 $N_{\text{macro}}=7, 19, 37$ 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 $\sigma=7.0$ dB と仮定している。また、DA—UE 間距離が小セル半径 R' 以下の場合 ($d_{u,n_{\text{mbs}}} \leq R'$)、フェージングチャンネルは $K=10$ dB の周波数選択性仲上・ライスフェージングチャンネルになり、一方 DA—UE 間距離が小セル半径 R' より大きい場合 ($d_{u,n_{\text{mbs}}} > R'$) は、周波数選択性レイリーフェージング (つまり $K=0$ dB) になるものと仮定している。また、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。ユーザ間の公平性の指標である FI は以下のように定義される [9]。

$$FI = \frac{\left(\sum_{u=0}^{U_{act}-1} \frac{1}{T_{ave}} \sum_{t=0}^{T_{ave}-1} C_u(t) \right)^2}{U_{act} \cdot \sum_{u=0}^{U_{act}-1} \left| \frac{1}{T_{ave}} \sum_{t=0}^{T_{ave}-1} C_u(t) \right|^2} \quad (17)$$

ここで T_{ave} ($\gg T_{PF}$) は $C_u(t)$ の時間平均区間である。

本稿では、チャンネル推定は理想的に行えるものと仮定している。平均合計リンク容量、UE リンク容量の累積分布関数 (CDF) および平均 FI の関係を計算機シミュレーションにより求め、UE リンク容量の CDF の 5% 値を 5% アウテージ UE リンク容量と呼ぶ。

表 1 シミュレーション諸元

Network	No. of distributed antennas	$N_{macro}=7, 19, 37$
	Small-cell radius	$R'=R/\sqrt{N_{macro}}$
Transmitter/Receiver	Normalized transmit E_s/N_0	$E_s/N_0=0dB$
	No. of FFT/IFFT block size	$N_c=1024$
	Guard interval length	$N_g=16$
	No. of transmit antennas	$N_{mbs}=4$
	No. of receive antennas	$N_{uc}=2$
Propagation channel	Path loss exponent	$\alpha=3.5$
	Shadowing loss standard deviation	$\sigma=7.0dB$
	Channel estimation	Ideal
	Frequency-Selective block Nakagami-Rice and Rayleigh fading	
	K factor of Nakagami-Rice	$K=10dB$
Power delay profile (PDP) shape	16-path uniform	

5.1. 分散アンテナ本数の効果

図 3 に送受信アンテナ本数 $N_{mbs} \times N_{uc}=4 \times 2$ 、多重ユーザ数/アクティブユーザ数が $2/56$ の条件にて、マクロセル内の DA 本数 N_{macro} を 7, 19, 37 本と増やした場合の平均合計リンク容量と平均 FI の関係を示す。次いで、図 4 に同条件下の 5% アウテージ UE リンク容量と平均 FI の関係を示す。

図 3 より、DA 本数 N_{macro} が 7, 19, 37 本と増えるにつれて各スケジューリングの合計リンク容量と FI が向上することが分かる。また、RR と PF スケジューリングの特性差は DA 本数が増えるにつれて小さくなるのが分かる ($N_{macro}=7 \rightarrow 37$ とした場合、FI の差は約 2.3 \rightarrow 約 1.2%，合計リンク容量の差は約 4.0% \rightarrow 約 1.6%)。これは、マクロセル内の DA 本数が増えたことで、UE 近傍の DA が選択されることにより伝搬損失とシャドウィング損失が低減されたことと、被選択 DA 本数が増えたことによりアンテナ選択による空間ダイバーシティ効果が高まったことで、各 UE のリンク容量が向上すると共に UE 間のリンク容量の差が小さくなったためである。

同様の理由にて、図 4 では DA 本数 (N_{macro}) が増えるにつれて、セル端ユーザの品質が向上していることが分かる。また、図 4 から分かるように、Max-SNR スケジューリングの 5% アウテージ UE リンク容量が非常に小さいことが分かる。これは、Max-SNR

スケジューリングでは合計リンク容量が最大になるようにチャンネル状態の良いユーザのみを常に選択するため、リンク容量の低いユーザには通信機会がほぼ与えられないためである。

これらの理由より、周辺セルからの CCI が存在するマルチセル環境下においても、通信マクロセル内の平均合計リンク容量を向上するにはマクロセル内の DA 本数 (N_{macro}) を増やすことが効果的であることと、簡易な処理の RR スケジューリングを用いても PF スケジューリングと同程度の平均合計リンク容量と FI が得られることが分かる。

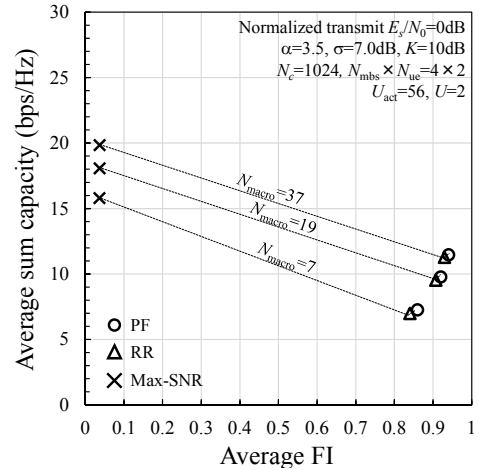


図 3 平均合計リンク容量と平均 FI の関係 ($N_{macro}=7, 19, 37$)

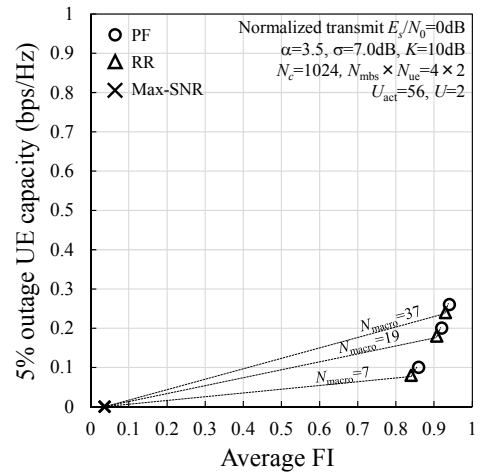


図 4 5% アウテージ UE リンク容量と平均 FI の関係 ($N_{macro}=7, 19, 37$)

5.2. アンテナ配置法の影響

図 6 に、 $N_{macro}=37$ とし、DA をランダム配置した場合の小セルネットワークモデルを示す。最小 DA 間距離 d_{DA-DA} は、小セル半径 R' ($=R/\sqrt{N_{macro}}$) の 10 分の 1 以上となるように制限している。

図 7 に送受信アンテナ本数 $N_{mbs} \times N_{uc}=4 \times 2$ 、多重ユーザ数/アクティブユーザ数が $2/56$ の条件にて、規則的 DA 配置とランダム DA 配置の場合の平均合計リン

ク容量と平均 FI の関係を示す。図 7 より、DA をランダム配置した場合でも、DA を規則的に配置した場合と同程度の特性が得られることが分かる。PF と RR スケジューリングでは、アンテナ配置法による FI の差は約 1.6%、合計リンク容量の差は約 1.0%となる。この理由は下記のように考えられる。DA をランダム配置した場合でも、マクロセル内に配置される DA 数 (N_{macro}) が十分に多ければ、UE 近傍にはチャネル利得の高い複数本の送信 DA が高い確率で存在し、また UE 近傍の DA のみを使用されることで、周辺セルの UE へ与える CCI は確率的に小さくなる。したがって、マクロセル全体に亘って高い SINR が得られるため、DA をランダム配置した場合でも、DA を規則的に配置した場合と比べて遜色の無い合計リンク容量と FI が得られる。

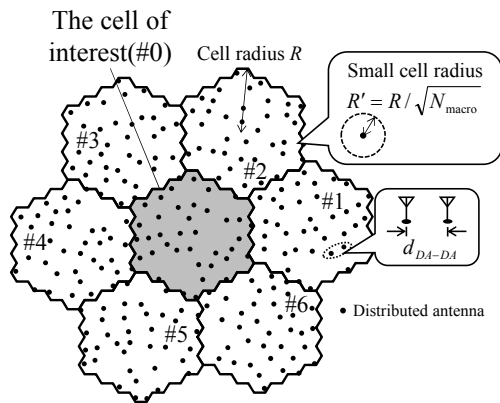


図 6 ランダム DA 配置を用いる小セルネットワークモデル ($N_{\text{macro}}=37$)

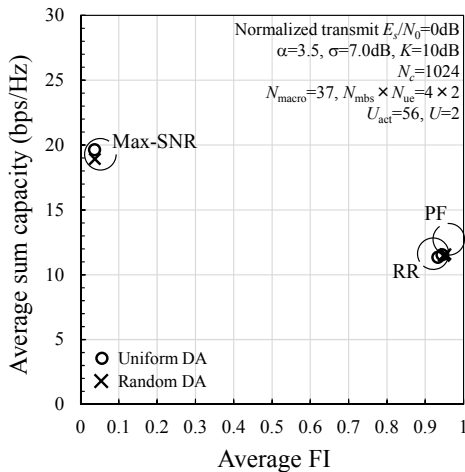


図 7 平均合計リンク容量と平均 FI の関係 ($N_{\text{macro}}=37$, 規則的 DA 配置—ランダム DA 配置)

6. まとめ

本報告では、STBC ダイバーシチを用いる大規模分散アンテナ小セルネットワークにおける OFDM 下りリンク伝送を対象に、PF、RR および Max-SNR スケジューリングによる平均合計リンク容量、UE リンク容量および平均 FI を求めた。

STBC ダイバーシチを用いる広帯域移動無線通信では、RR と PF スケジューリングの特性差が僅かになる

ことから、簡易な処理の RR スケジューリングで十分であることを明らかにした。さらにアンテナ配置法(規則的配置とランダム配置)の影響についても検討し、分散アンテナ本数 (N_{macro}) が十分に多ければアンテナ配置法が合計リンク容量と FI にほとんど影響を与えない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～」(#0155-0019, 2016 年 4 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] 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.
- [3] 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.
- [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. Calderbark, “Space-time block coding for wireless communications: performance results,” *IEEE J. Sel. Areas. Commun.*, vol. 17, no. 3, pp. 451-460, Mar. 1999.
- [6] H. Tomeba, K. Takeda, and F. Adachi, “Space-time block coded joint transmit/receive diversity in a frequency-nonselective Rayleigh fading channel,” *IEICE Trans. Commun.*, Vol. E89-B, No. 8, pp. 2189-2195, Aug. 2006.
- [7] 盛夢都, 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を用いる OFDMA 下りリンクにおけるスケジューリングに関する検討,” 信学技報, vol. 115, no. 472, RCS2015-337, pp. 25-30, 2016 年 3 月.
- [8] 齋藤智之, 安達文幸, “STBC ダイバーシチを用いる協調分散アンテナネットワークにおけるスケジューリングに関する一検討,” 信学技報, vol. 116, no. 257, RCS2016-154, pp. 7-12, 2016 年 10 月.
- [9] 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.
- [10] E. Dahlman, S. Parkvall, and J. Sköld, *4G:LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband*, 2nd ed., Academic Press, 2014.