

# 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

盛 夢都<sup>†</sup> 宮崎 寛之<sup>†</sup> 安達 文幸<sup>‡</sup>

<sup>†</sup> <sup>‡</sup> 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: <sup>†</sup> {mori, miyazaki}@mobile.ecei.tohoku.ac.jp, <sup>‡</sup> adachi@ecei.tohoku.ac.jp

あらまし 周波数選択性フェージングに強い直交周波数分割マルチアクセス(OFDMA)と各ユーザの通信状態が異なることを積極的に利用するマルチユーザスケジューリングを用いればユーザ当たりのチャンネル容量を向上できる。これまでのマクロセルネットワークでは、UE の通信状態がセル中央およびセル端で大きく異なるため、公平性を保ちつつチャンネル容量を向上可能な Proportional Fairness (PF)-map スケジューリングが広く用いられている。第5世代移動通信システムの実現に向けて最近検討され出した分散アンテナを用いる小セルネットワークでは、常にUE近傍に複数の分散アンテナが存在しているため、UEの通信状態がマクロセル内でほぼ均一にできる。この結果、PF-map スケジューリング以外のスケジューリングを用いても、公平性を確保しつつ高いチャンネル容量を達成できると考えられる。

そこで本稿では、分散アンテナを用いる小セルネットワークを対象に、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ついて検討している。マクロセル内に7本の分散アンテナを等間隔で分散配置し、UE がセル内に一様分布する場合について、PF-map スケジューリングおよび Max-map スケジューリング、ラウンドロビンを用いるときのチャンネル容量および公平性指標を計算機シミュレーションにより求めている。その結果、分散アンテナを用いた小セルネットワークでは、ラウンドロビンを用いても、PF-map スケジューリングとほぼ同等のユーザリンク容量を達成できること、また、90%アウトエージリンク容量は Max-map スケジューリングより低いものの、10%アウトエージリンク容量を高く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る小セルネットワーク, OFDMA, スケジューリング

## Study on Scheduling for OFDMA Downlink Using Distributed Antenna Space-Time Block Coded Diversity

Yumeto MORI<sup>†</sup> Hiroyuki MIYAZAKI<sup>†</sup> and Fumiyuki ADACHI<sup>‡</sup>

<sup>†</sup> <sup>‡</sup> Department of Communications Engineering, Graduate School of Engineering, Tohoku University

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

E-mail: <sup>†</sup> {mori, miyazaki}@mobile.ecei.tohoku.ac.jp, <sup>‡</sup> adachi@ecei.tohoku.ac.jp

**Abstract** The user downlink capacity can be improved by using Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA) and the multi-user scheduling which exploits a fact that the channel condition is different for a different user. In conventional macro-cell networks, the proportional fairness (PF)-map scheduling is adopted since users at different locations in a macro-cell area experience quite different channel conditions to each other. However, in a small-cell structured network using distributed antennas which is recently under an extensive study toward the fifth-generation mobile communication systems, the channel condition of a user becomes similar to each other and therefore, other scheduling schemes rather than PF map scheduling can be used. In this paper, we consider the PF-map scheduling, max-map scheduling and round-robin and we evaluate the achievable downlink channel capacity and fairness. We will show that the round-robin achieves similar channel capacity to the PF-map scheduling and that although the 90%-outage user capacity is lower than the max-map scheduling, it achieves the 10%-outage user capacity higher than the max-map scheduling.

**Keywords** Small cell network using a distributed antenna, OFDMA, Scheduling

## 1. まえがき

第5世代移動無線通信システムでは、第4世代以上の高速かつ大容量なデータ伝送が求められている。分散アンテナを用いる小セルネットワークは、アンテナが基地局に集中配置されている従来マクロセルネットワークと比べ、伝搬損失およびシャドウイング損失の影響を低減でき、マクロセル全域で優れた伝送品質を達成できる[2]。また下りリンク伝送では、直交周波数分割マルチアクセス (OFDMA) [3]と時空間ブロック符号化送受信協調ダイバーシチ (STBC-JTRD) [4]を用いることで、周波数選択性フェージングの影響を克服でき、さらに伝送品質を改善できることが知られている。

ところで、下りリンク OFDMA において、ユーザ間の公平性を保ちつつ、高い通信容量を達成するためには、マルチユーザスケジューリングが必須である。アンテナがセル中央に集中配置されている従来マクロセルネットワークでは、ユーザの通信状態がセル中央とセル端で大きく異なるため、公平性を保ちつつチャンネル容量を向上できる Proportional Fairness (PF)-map スケジューリング[5]が広く用いられている。一方、分散アンテナを用いる小セルネットワークでは、セル内ユーザの通信状態がほぼ均一になることから、PF-map スケジューリング以外のスケジューリングを用いても公平性を確保しつつ高いチャンネル容量を達成できると考えられる。

そこで本稿では、分散アンテナを用いる小セルネットワークを対象に、時空間符号化送受信協調ダイバーシチ (STBC-JTRD)[5]を用いる OFDMA 下りリンクにおけるスケジューリングについて検討している。PF-map スケジューリングおよび Max-map スケジューリング[6]、ラウンドロビンを用いるときの下りリンクチャンネル容量および公平性指標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を比較している。

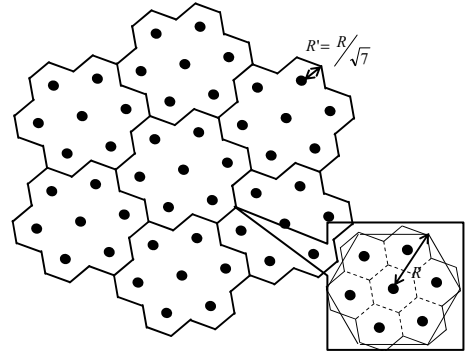
本稿の構成は以下のようになっている。第2章にて本稿で用いる分散アンテナを用いる小セルネットワークモデルおよびチャンネルモデルについて説明する。その後、第3章にて、送信 FDE および STBC ダイバーシチを用いる OFDMA 下りリンクにおける送受信信号表現および受信信号電力対干渉雑音電力比 (SINR) について述べた後、第4章にて本稿で用いる3つのスケジューリングについて述べる。第5章で計算機シミュレーション結果を示した後、第6章でまとめる。

## 2. 分散アンテナを用いる小セルネットワークモデル

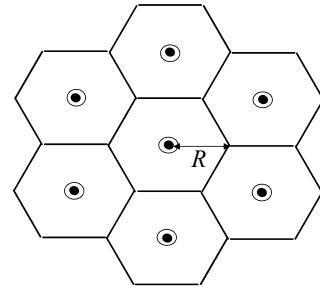
### 2.1. ネットワークモデル

本稿ではマルチセル・マルチユーザ環境を仮定している。分散アンテナを用いる小セルネットワークでは、セル内に  $N_{total}$  本のアンテナが分散配置されている。一方、従来マクロセルネットワークでは、セル中央に全アンテナが集中配置されている。図1に、マクロセル内に  $N_{total}$  本の分散アンテナが配置されている小セルネットワークのモデルを示す (一例として  $N_{total}=7$  本の場合)。各分散アンテナは光ファイバなどによって信号処理装置 (BBU) と接続されており、分散アン

テナーBBU 間は理想的に伝送を行えるものと仮定している。本稿では中央のセルを注目セルとし、周囲6セルから干渉を受けると仮定している。各セルには  $N_{UE}$  本の受信アンテナを持つユーザ端末 (UE) が  $U$  台存在しているものとし、各ユーザはセル内に存在する分散アンテナの中から瞬時受信電力の降べき順に  $N_t$  本の分散アンテナを送信アンテナとして選択して通信を行うものとする。



(a) 分散アンテナを用いる小セルネットワーク ( $N_{total}=7$  本の場合)



(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. チャンネルモデル

本稿では、広帯域無線伝搬チャンネルが伝搬損失、対数正規分布に従うシャドウイング損失および遅延時間の異なる  $L$  遅延パスからなる周波数選択性フェージングにより特徴づけられるものと仮定している[1]。また端末が分散アンテナ近傍に存在する場合、伝搬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。そこで本稿ではアンテナーユーザ間距離が  $R'$  以下の場合には、直接波が存在する仲上・ライスフェージング環境を、 $R'$  より大きい場合はレイリーフェージング環境をそれぞれ仮定している。第  $u$  ユーザ端末の瞬時受信電力が第  $n_t$  番目に大きい分散アンテナ (第  $n_t$  分散アンテナ) - 第  $u$  ユーザ端末の第  $n_r$  受信アンテナ (第  $n_r$  ユーザアンテナ) 間におけるチャンネルのインパルス応答  $\tilde{h}_{u,n_t,n_r}(\tau)$  は次式で表される。

$$\tilde{h}_{u,n_t,n_r}(\tau) = \begin{cases} \sqrt{D_{u,n_t,n_r}^{-\alpha} \cdot 10^{-\frac{\eta_{u,n_t,n_r}}{10}}} \left\{ \sqrt{\frac{K}{K+1}} \cdot \tilde{g}_{u,n_t,n_r} \cdot \delta(\tau) \right. \\ \left. + \sqrt{\frac{1}{K+1}} \sum_{l=0}^{L-1} \tilde{g}_{u,n_t,n_r,l} \cdot \delta(\tau - \tau_{u,n_t,n_r,l}) \right\} & \text{if } D_{u,n_t,n_r} \leq R' \quad (1) \\ \sqrt{D_{u,n_t,n_r}^{-\alpha} \cdot 10^{-\frac{\eta_{u,n_t,n_r}}{10}}} \sum_{l=0}^{L-1} \tilde{g}_{u,n_t,n_r,l} \cdot \delta(\tau - \tau_{u,n_t,n_r,l}) & \text{otherwise} \end{cases}$$

ここで  $D_{u,n_t,n_r}$  は第  $n_t$  分散アンテナー第  $n_r$  ユーザアンテナ間距離であり、 $K$  は伸上・ライスフェージングの  $K$  ファクタである。ただし、 $\alpha$  は伝搬損失指数であり、 $\eta_{u,n_t,n_r}$  は第  $n_t$  分散アンテナー第  $n_r$  ユーザアンテナ間のシャドウイング損失 (dB) を表している。 $\hat{g}_{u,n_t,n_r}$  および  $\tilde{g}_{u,n_t,n_r,l}$  は第  $n_t$  分散アンテナー第  $n_r$  ユーザアンテナ間の直接パスおよび第  $l$  遅延パスの複素パス利得である。また  $\tau_{u,n_t,n_r,l}$  は第  $n_t$  分散アンテナー第  $n_r$  ユーザアンテナ間の第  $l$  遅延パスの遅延時間である。

このとき、第  $n_t$  分散アンテナー第  $n_r$  ユーザアンテナ間の瞬時受信電力  $P_{u,n_t,n_r}$  は次式で表される。

$$P_{n_t} = p_{n_t} \cdot D_{u,n_t,n_r}^{-\alpha} \cdot \left( |g_{u,n_t,n_r,0}|^2 + 10^{\frac{\eta_{u,n_t,n_r}}{10}} \cdot \sum_{l=0}^{L-1} |g_{u,n_t,n_r,l}|^2 \right) \quad (2)$$

ここで  $p_{n_t}$  は第  $n_t$  分散アンテナの送信電力である。式 (2) は次式のように変形できる。

$$P_{n_t} = P_{n_t} \cdot d_{u,n_t,n_r}^{-\alpha} \cdot \left( |g_{u,n_t,n_r,0}|^2 + 10^{\frac{\eta_{u,n_t,n_r}}{10}} \cdot \sum_{l=0}^{L-1} |g_{u,n_t,n_r,l}|^2 \right) \quad (3)$$

ただし、 $P_{n_t} = p_{n_t} R^{-\alpha}$  は第  $n_t$  分散アンテナの正規化送信電力であり、 $d_{u,n_t,n_r} = D_{u,n_t,n_r} / R$  はマクロセル半径  $R$  で正規化された第  $n_t$  分散アンテナー第  $n_r$  ユーザアンテナ間距離である。

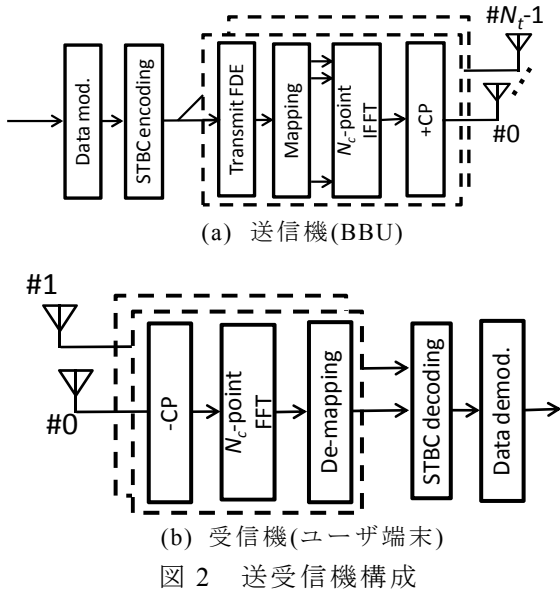


図 2 送受信機構成

### 3. 送信 FDE および STBC ダイバーシチを用いる OFDMA 伝送系

#### 3.1. 伝送系

本章で仮定している送信 FDE と STBC ダイバーシチを用いる下りリンク OFDMA における送受信機構成を図 3.2 に示す。なお本研究では、全帯域を  $N_c/M_{total}$  サブキャリアからなる  $M_{total}$  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スケジューリングが行われるものと仮定している。

以降、サンプル時間間隔  $T_c$  の離散時間等価低域表現を用いる。またスケジューリングによって選択された

第  $u$  ユーザに着目し、第  $u$  ユーザには  $M$  個のリソースブロックが割り当てられていると仮定する。

まず送信局である信号処理局は、 $N_c/M_{total} \times M$  のデータシンボルからなる  $J$  個の送信信号ブロックに分割する。その後 STBC を行い、 $N_r \times Q$  個の符号化ブロックを生成する。次に、 $N_t \times N_r$  の送信 FDE 重み行列を乗算することで  $N_t \times Q$  個の送信信号系列を得る。第  $u$  ユーザの第  $j$  送信ブロックを  $\{D_{u,j}(m); j=0,1, m=0, \dots, MN_c/M_{total}-1\}$  とすると、第  $u$  ユーザの送信信号行列  $S_u(m)$  は次式で与えられる。

$$S_u(m) = \sqrt{2P_t} C(m) W_t^H(m) D(m) \quad (4)$$

ここで、

$$C_u(m) = \frac{1}{\sqrt{\sum_{n_t=0}^{N_{total}-1} \sum_{n_r=0}^{N_r-1} |W_{u,n_t,n_r}(\varepsilon_u(m))|^2}} \quad (5)$$

は送信信号電力を一定に保つための電力正規化係数である。また  $D(m)$  は STBC 符号化行列であり、以下の式で表わされる。

$$D(m) = \begin{pmatrix} D_{u,0}(m) & -D_{u,1}^*(m) \\ D_{u,1}(m) & D_{u,0}^*(m) \end{pmatrix} \quad (6)$$

$W_{u,t}(k) = [W_{u,0}(k), \dots, W_{u,N_{total}-1}(k)]$  は送信 FDE 重みであり、 $W_{u,n_t}(k) = [W_{u,n_t,0}(k), \dots, W_{u,n_t,N_r-1}(k)]^T$  で表わされる。送信 FDE は以下で与えられる。

$$W_{u,n_t,n_r}(k) = H_{u,n_t,n_r}^*(k) \quad (7)$$

以上の操作を多重するユーザ数分行った後、 $N_c$  個のサブキャリアからなる帯域内に各ユーザの信号を割り当てたりリソースブロックへマッピングする。マッピング後の送信信号行列は次式で与えられる。

$$X(\varepsilon_u(m)) = \sum_{u=0}^{U-1} S_u(m) \quad (8)$$

ここで  $\varepsilon_u(m)$  は第  $u$  ユーザの第  $m$  サブキャリアが割り当てられるサブキャリアのインデックスである。その後各送信信号ブロックに対して  $N_c$  ポイント IFFT を適用して OFDM 信号を生成する。最後に、各ブロックの先頭のガードインターバルにサイクリックプレフィックスを挿入した後、 $N_t$  本のアンテナから信号を送信する。

ユーザ端末では、受信した信号から CP を除去した後  $N_c$  ポイント FFT を適用し、サブキャリアデマッピングを行い第  $u$  ユーザの信号を取り出す。第  $u$  ユーザにおけるデマッピング後の  $N_r \times Q$  受信信号行列は次式で表わされる。

$$R_u(m) = \sqrt{2P_t} H_u(\varepsilon_u(m)) S_u(m) + I_u(m) + N_u(m) \quad (9)$$

ここで、 $P_t$  は送信信号電力である。 $H_u(k) = [H_{u,0}(k), \dots, H_{u,N_{total}-1}(k)]$  は  $H_{u,n_t}(k) = [H_{u,n_t,0}(k), \dots, H_{u,n_t,N_r-1}(k)]^T$  で表わされる第  $n_t$  分散アンテナー第  $u$  ユーザの  $N_t \times N_r$  チャネル行列であり、 $H_{u,n_t,n_r}(k)$  は第  $n_t$  分散アンテナー第  $u$  ユーザ第  $n_r$

アンテナ間チャンネルの伝達関数である。\$\mathbf{I}\_u(k)\$は \$N\_r \times Q\$ 同一チャンネル干渉(CCI)行列であり、その第 \$n\_r\$ 行第 \$q\$ 列要素は以下の式で表わされる。

$$I_{u,n_r,q}(k) = P_t C(k) \sum_{\substack{c'=0 \\ c' \neq c}}^{C-1} \sum_{n_t=0}^{N_{total}-1} \left| H_{u,n_t,n_r}^{c' \rightarrow c}(k) W_{u,n_t,n_r}^{c' \rightarrow c}(k) \right|^2 \quad (10)$$

ここで \$H\_{u,n\_t,n\_r}^{c' \rightarrow c}(k)\$ および \$W\_{u,n\_t,n\_r}^{c' \rightarrow c}(k)\$ は第 \$c'\$ セル第 \$n\_t\$ アンテナー第 \$u\$ ユーザ第 \$n\_r\$ アンテナ間チャンネルの伝達関数および送信 FDE 重みである。\$\mathbf{N}\_u(k)\$ は \$N\_r \times Q\$ 雑音行列であり、各要素は零平均分散 \$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。最後に STBC 復号を行った後、データ復調を行う。

### 3.2. 下りリンク容量

本章では、STBC 復号後の受信信号対干渉雑音電力比(SINR)をシャノンの容量式[7]に代入することで下りリンク容量を求める。第 \$u\$ ユーザの下りリンク容量 \$C\_u\$ は次式で表わされる。

$$C_u = \frac{1}{M_{total}} \sum_{n=0}^{M_{total}-1} \alpha_u(n) \sum_{k=n \cdot N_c / M_{total}}^{(n+1) \cdot N_c / M_{total}-1} \log_2(1 + \gamma_u(k)) \quad (11)$$

ここで \$\alpha\_u(n)\$ は第 \$n\$ リソースブロックが第 \$u\$ ユーザに割り当てられるかを示す指標であり、割り当てられる場合は 1、割り当てられない場合は 0 となる。また \$\gamma\_u(k)\$ は第 \$u\$ ユーザに第 \$k\$ サブキャリアが割り当てられた場合における STBC 復号後の SINR であり、次式で表わされる。

$$\gamma_u(k) = \frac{2P_t \left| \sum_{n_r=0}^{N_r-1} \sum_{n_t=0}^{N_{total}-1} W_{u,n_t,n_r}(k) H_{u,n_t,n_r}(k) \right|^2}{P_t \sum_{\substack{c'=0 \\ c' \neq c}}^{C-1} \sum_{n_t=0}^{N_{total}-1} \left| H_{u,n_t,n_r}^{c' \rightarrow c}(k) W_{u,n_t,n_r}^{c' \rightarrow c}(k) \right|^2 + N_{UE} N} \quad (12)$$

ただし、\$N\$ は雑音電力である。

## 4. マルチユーザスケジューリング

本稿では、マルチユーザスケジューリング手法として PF-map スケジューリングと Max-map スケジューリング、ラウンドロビンの 3 つについて検討している。

なお、本稿では、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たスケジューリングを仮定している。

### 4.1. PF-map スケジューリング

PF-map スケジューリングは平均チャンネル容量で正規化された正規化チャンネル容量を最大とするユーザにリソースブロックを割り当てる。第 \$n\$ リソースブロックに割り当てられるユーザのインデックス \$u^\*\$ は次式で与えられる。

$$u^* = \arg \max_{1 \leq u \leq U} \frac{\tilde{C}_u(n,t)}{C_u(t)} \quad (13)$$

ここで \$\tilde{C}\_u(n,t)\$ は第 \$t\$ タイムスロットにおいて第 \$n\$ リン

スブロックを第 \$u\$ ユーザに割り当てた場合におけるチャンネル容量であり、次式で与えられる。

$$\tilde{C}_u(n,t) = \sum_{m=0}^{N_c/M_{total}-1} \log_2 \left( 1 + \frac{P_t}{N_{UE} N} \sum_{n_r=0}^{N_r-1} \sum_{n_t=0}^{N_{total}-1} \left| H_{u,n_t,n_r} \left( n \frac{N_c}{M} + m \right) \right|^2 \right) \quad (14)$$

また \$\bar{C}\_u(t)\$ は第 \$u\$ ユーザの第 \$t\$ タイムスロットまでの平均チャンネルであり、次式で与えられる。

$$\bar{C}_u(t) = \begin{cases} \left( 1 - \frac{1}{T_{ave}} \right) \bar{C}_u(t-1) & u \neq u^* \\ \left( 1 - \frac{1}{T_{ave}} \right) \bar{C}_u(t-1) + \frac{1}{T_{ave}} C_u(t) & u = u^* \end{cases} \quad (15)$$

ただし、\$T\_{ave}\$ は平均化区間である。PF-map スケジューリングは公平性を保ちつつ、合計チャンネル容量を向上させることができる。

### 4.2. Max-map スケジューリング

Max-map スケジューリングはチャンネル容量を最大とするユーザにリソースブロックを割り当てる。第 \$n\$ リソースブロックに割り当てられるユーザのインデックス \$u^\*\$ は次式で与えられる。

$$u^* = \arg \max_{0 \leq u \leq U-1} \tilde{C}_u(n,t) \quad (16)$$

Max-map スケジューリングは各タイムスロットにおける瞬時チャンネル容量に基づいてスケジューリングを行う。なお Max-map スケジューリングは合計チャンネル容量を最大とするものの公平性は低いという特徴がある。しかしながら、分散アンテナを用いる小セルネットワークではアンテナが分散配置しているため、ユーザ間のチャンネル状態がほぼ均一である。従って、公平性を保ちつつ、高いチャンネル容量を達成できると考えられる。

### 4.3. ラウンドロビン

ラウンドロビンはタイムスロット毎にリソースブロックを各ユーザに順番に割り当てていくスケジューリング法である。従って通信機会は全てのユーザに平等に訪れるが、各ユーザのチャンネル容量は必ずしも公平ではないという特徴がある。しかしながら、分散アンテナを用いる小セルネットワークではアンテナが分散配置しているため、ユーザ間のチャンネル状態がほぼ均一である。したがって、ラウンドロビンを用いた場合においてもある程度高いチャンネル容量を保ちつつ、高い公平性を達成できると考えられる。

## 5. 計算機シミュレーション結果

### 5.1. 計算機シミュレーション諸元

シミュレーション諸元を表 1 に示す。FFT ポイント数および CP 長はそれぞれ \$N\_c=128, N\_g=32\$ としている。また、リソースブロック数は \$M=8\$ としている。セル内の総設置アンテナ本数は \$N\_{total}=7\$ 本としている。各分散アンテナが半径 \$R'=R/\sqrt{7}\$ の正六角形小セルを形成し、7 つの分散アンテナが協調してマクロセルを形成していると仮定する。ここで \$R\$ はマクロセル半径であ

る。伝搬チャネルは  $D_{u,n_r,n_t} > R'$  の場合は一様電力遅延プロファイルを有する  $L=16$  パス周波数選択性レイリフェージングで特徴づけられるものとし、アンテナ-ユーザ間距離が  $D_{u,n_r,n_t} \leq R'$  の場合は  $K=10$  (dB) および一様電力遅延プロファイルを有する  $L=16$  パス周波数選択性仲上・ライスフェージングチャネルを仮定している。また、正規化送信  $E_s/N_0=10$  (dB) としている。伝搬損失指数は  $\alpha=3.5$ 、シャドウイングの標準偏差は  $\delta=7.0$  (dB) と仮定する。また、一例として各セル内には  $U=32$  人のユーザが存在するものとしている。本稿では公平性の指標として Fairness index[8]を導入する。Fairness index,  $F$  は以下の式で表わされる。

$$F = \frac{\left( \sum_{u=0}^{U-1} \frac{1}{T_s} \sum_{t=0}^{T_s-1} C_u(t) \right)^2}{U \cdot \sum_{u=0}^{U-1} \left( \frac{1}{T_s} \sum_{t=0}^{T_s-1} C_u(t) \right)^2} \quad (17)$$

また、下りリンク容量の累積分布関数(CDF)の  $x\%$  値を  $x\%$  アウテージリンク容量と定義する。

表 1 計算機シミュレーション諸元

Number of subcarriers	$N_c=128$
Guard interval length	$N_g=32$
Number of resource block	$M=8$
Number of users	$U=32$
Number of transmit antennas	$N_t=1,4$
Number of UE antennas	$N_{UE}=2$
Power delay profile	$L=16$ -path uniform power delay profile
Fading	Frequency-selective block Rayleigh/Nakagami-Rice fading
$K$ factor of Nakagami-Rice fading	$K=10$ (dB)
Delay time	$\tau_l=l$ (symbols) ( $l=0 \sim L-1$ )
Path loss exponent	$\alpha=3.5$
Shadowing loss standard deviation	$\delta=7.0$ (dB)

## 5.2. 下りリンク容量

図 4,5 に OFDMA を用いた分散アンテナを用いる小セルネットワークにおける 10%, 90%アウテージリンク容量と公平性との関係を示す。また比較のため、OFDMA を用いた従来マクロセルネットワークの特性も同様に図 4, 5 に示す。図 4 より、分散アンテナを用いる小セルネットワークにおいてはアンテナ本数によらず、ラウンドロビンを用いることで、高い公平性を保ちつつ、PF-map スケジューリングを用いた場合とほぼ同等の 10%アウテージリンク容量を獲得することが分かる。分散アンテナを用いる小セルネットワークではアンテナが分散配置されているため、全ユーザの受信電力がほぼ均一であると考えられる。そのため、ラ

ウンドロビンのような固定の順番でユーザにリソースブロックを割り当てるようなスケジューリング法でも PF-map とほぼ同等の 10%アウテージリンク容量を達成できる。一方で、従来マクロセルネットワークにおいては  $N_t=1$  のとき、PF-map スケジューリングを用いることでラウンドロビンを用いる場合より高い 10%アウテージリンク容量を達成できている。従来マクロセルネットワークではアンテナ-ユーザ間距離によって、セル中央とセル端のユーザでは受信電力に大きな差がある。ここで PF-map スケジューリングは受信品質の悪いユーザに対して多くの通信機会を与えるように動作するが、ラウンドロビンはユーザの受信品質によらず順番に通信機会を与える。そのため、ラウンドロビンを行った場合、PF-map スケジューリングと比べて 10%アウテージリンク容量は小さくなってしまふ。また、ネットワーク構成によらず、Max-map スケジューリングを用いると 10%アウテージリンク容量が非常に小さくなっている。これは、Max-map スケジューリングでは合計チャネル容量が最大となるよう、チャネル状態の良いユーザのみが選択されるためである。

また図 5 より、ネットワーク構成によらず、PF-map スケジューリングおよびラウンドロビンを用いる場合、Max-map スケジューリングを用いる場合よりも 90%アウテージリンク容量が低いものの、分散アンテナを用いる小セルネットワークでは、ラウンドロビンを用いても PF-map スケジューリングとほぼ同等の 90%アウテージリンク容量を達成できることがわかる。

以上のことから、STBC ダイバーシチを導入した分散アンテナを用いる小セルネットワークでは、ラウンドロビンのような簡易なスケジューリングでも、PF-map スケジューリングより高い公平性と 10%アウテージリンク容量を達成できるといえる。

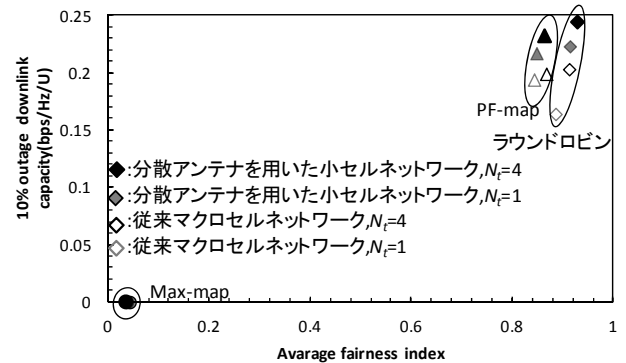


図 4 : 10%アウテージリンク容量と公平性との関係

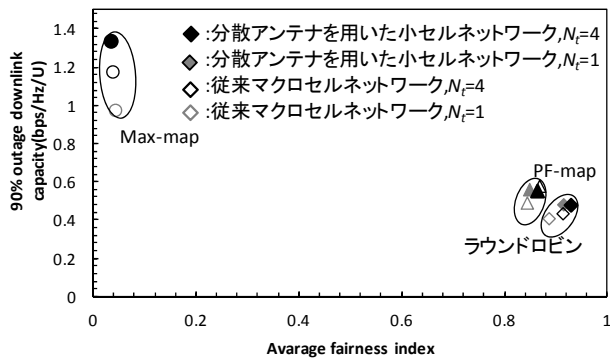


図 5 : 90%アウトージリンク容量と公平性との関係

## 6. むすび

本稿では、分散アンテナを用いる小セルネットワークの STBC-JTRD を用いる OFDMA 下りリンクを対象に、Max-map スケジューリング、PF-map スケジューリングおよびラウンドロビンによるチャネル容量およびユーザ間の公平性について検討した。分散アンテナを用いる小セルネットワークでは、ラウンドロビンを用いても、PF-map スケジューリングとほぼ同等のリンク容量を達成できること、また、90%アウトージリンク容量は Max-map スケジューリングより低いものの、10%アウトージリンク容量を高く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] A. Goldsmith, *Wireless Communication*, Cambridge University Press, 2005.
- [2] F. Adachi, K. Takeda, T. Yamamoto, R. Matsukawa and S. Kumagai “Recent advances in single-carrier distributed antenna network”, Wiley Online Library November 2011
- [3] R. Prasad, *OFDM for wireless communications systems*, Artech House, 2004
- [4] J. Lim, H. Myung, K. Oh, and D. Goodman, “Proportional fair scheduling of uplink single-carrier FDMA systems,” Proc. IEEE Personal, Indoor and Mobile Radio Commun. (PIMRC’06), pp.1-6, Helsinki, Finland, Sept. 2006.
- [5] H. Tomeba, K. Takeda, and F. Adachi, "Space-Time Block Coded-Joint Transmit/Receive Antenna Diversity using more than 4 Receive Antennas," 2008 IEEE 68th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall), Calgary, Canada, 21-25 September 2008.
- [6] H. Matsuda, K. Takeda, and F. Adachi, “Channel capacity of SC-FDMA distributed antenna network using transmit diversity,” (in Japanese) IEICE Technical Report, RCS2009-303, pp.263-268, Mar. 2010.

- [7] J. G. Proakis and M. Salehi, *Digital communications*, 5th ed., McGraw- Hill, 2008.
- [8] R. Jain et al., DEC Research Report TR-301, Sept. 1984.e