

上りリンク SC-FDMA/SDMA における同時接続ユーザ数選択スケジューリング法に関する一検討

岩田 隆芳[†] 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: [†]{iwata, miyazaki}@mobile.ecei.tohoku.ac.jp, [‡]adachi@ecei.tohoku.ac.jp

あらまし 以前筆者らは、シングルキャリア周波数分割マルチアクセス(SC-FDMA)を対象に、同時接続ユーザ数を任意に選択可能な変形 Max-map ユーザスケジューリングアルゴリズムを提案し、チャンネル容量と公平性のトレードオフを制御できることを明らかにした。本稿では、これをシングルキャリア周波数空間分割マルチアクセス (SC-FDMA/SDMA) への応用について検討している。SC-FDMA/SDMA における変形 Max-map スケジューリングでは、はじめに同時接続ユーザ数一定という条件下で各サブキャリアに対してチャンネル容量が最大となるようにユーザにサブキャリアを割り当てた後、すでにサブキャリアが割り当てられたユーザとの合計チャンネル容量が最大となるようにユーザを空間的に多重する。上りリンク変形 Max-map を行った場合のシステムのチャンネル容量および公平性を計算機シミュレーションにより求め、空間多重数および同時接続ユーザ数がチャンネル容量と公平性に与える影響を示している。

キーワード SC-FDMA/SDMA, スケジューリング

A Study of Capacity-Fairness Controllable Scheduling for SC-FDMA/SDMA Uplink

Takayoshi IWATA[†] 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: [†]{iwata, kazuhiko, miyazaki, obara}@mobile.ecei.tohoku.ac.jp, [‡]adachi@ecei.tohoku.ac.jp

Abstract Recently, we proposed the scheduling methods which select the number of simultaneously accessing users for uplink single-carrier frequency division multiple access (SC-FDMA) and showed that the proposed scheduling can control the tradeoff between the capacity and the fairness. However, the user capacity gets decrease because we assumed that the number of subcarrier of selected users is equal among users for SC-FDMA. In this paper, we discuss a modified capacity-fairness controllable scheduling method for uplink single-carrier frequency division multiple access / space division multiple access (SC-FDMA/SDMA) to increase the capacity. We evaluate, by computer simulation, the sum capacity and the fairness among users when using the modified scheduling methods and show that impacts of the number of receive antennas, the number of spatial multiplexing users, and the number of simultaneously accessing users on the tradeoff between the capacity and the fairness.

Keyword SC-FDMA/SDMA, scheduling

1. まえがき

次世代移動無線通信では高速データサービスの提供が期待されている。しかしながら、ブロードバンド信号伝送では、チャンネルが周波数選択性フェージングで特徴づけられるため、伝送特性が大きく劣化してしまう[1]。直交周波数分割マルチアクセス(OFDMA)[2]では、複数の狭帯域直交サブキャリアを用いて並列伝送を行うため、周波数選択性フェージングに対する強い耐性を有する。しかし、送信信号のピーク対平均電力比(PAPR)が高く、線形電力増幅器の負担が大きくなるという問題がある[3]。そこで筆者らは、OFDMA に比べ PAPR が低いシングルキャリア周波数分割マルチアクセス(SC-FDMA)[4]に注目している。

SC-FDMA では、多数のユーザの中から同時接続ユーザを選択するスケジューリングの導入が必要である。

適切なスケジューリングを導入することにより、ユーザ数の増加に伴いマルチユーザダイバーシチ効果が得られ、高いチャンネル容量を達成できる[5]。合計チャンネル容量を最大化させるスケジューリング法として Max-map スケジューリング[6]が広く知られている。しかしながら、チャンネル容量と公平性にはトレードオフの関係があるもののこのトレードオフを制御できない。そこで、筆者らは同時接続ユーザ数を任意に選択可能な同時接続ユーザ数可変スケジューリング(以後、変形 Max-map と呼ぶ)を提案し、同時接続ユーザ数を可変にすることにより、チャンネル容量と公平性のトレードオフを制御可能なことを明らかにした[7]。しかし、これまでの検討ではすべてのユーザにサブキャリアを等配分していたため、同時接続ユーザ数が大きくなるにつれ、一人あたりのチャンネル容量が小さくなってし

まうという問題があった。

そこで本稿では、空間多重を用いるシングルキャリア周波数空間分割マルチアクセス (SC-FDMA/SDMA) [8] を対象に変形 Max-map を検討している。変形 Max-map では、はじめに同時接続ユーザ数一定という条件下でユーザのチャネル利得が最大となるようにサブキャリア毎にユーザを選択した後、すでに選択されたユーザとの合計チャネル容量が最大となるユーザをさらに多重する。変形 Max-map を用いた場合の合計チャネル容量および公平性を計算機シミュレーションにより求め、公平性を保ちつつ SC-FDMA の場合より高いチャネル容量を達成できることを明らかにしている。

本論文の構成は以下のようにになっている。2章にて上りリンク SC-FDMA/SDMA のシステムモデルを示し、次いで伝送モデルおよびチャネル容量を示す。3章にて変形 Max-map について述べる。4章にて数値計算により提案スケジューリング法を用いたときの合計チャネル容量および公平性を明らかにする。5章にてまとめる。

2. システムモデル

上りリンク SC-FDMA/SDMA のシステムモデルを図1に示す。本稿ではシングルセル・マルチユーザ環境を仮定しており、セル内に U ユーザが存在するものとする。セル半径が R の円形セルを仮定し、第 u ユーザ-基地局 (BS) 間の距離を R_u とする。

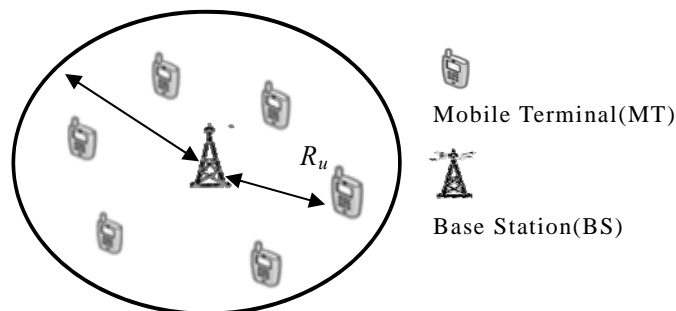


図1 システムモデル

総サブキャリア数を N_c とし、サブキャリアごとに U_δ のユーザを多重して SC-FDMA/SDMA 伝送を行うものとする。また同時接続ユーザを U_i 人選択するものとし、各ユーザに割り当てられるサブキャリア数 M は全て等しいものとする ($M = U_\delta \cdot N_c / U_i$)。

図2に SC-FDMA/SDMA の送受信機構成を示す。

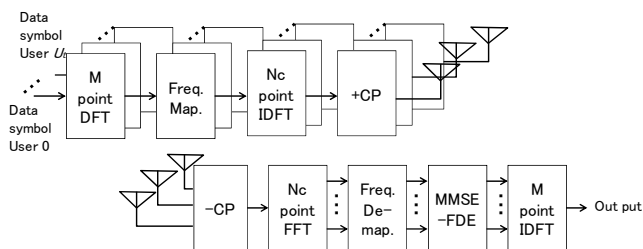


図2 送受信機構成

ユーザ側では M シンボルからなる送信信号ブロックに対し M ポイント離散フーリエ変換 (DFT) を適用して周波数領域信号に変換した後、 N_c 個のサブキャリア

からなるシステム帯域上にマッピングする。次いでマッピング後の周波数領域信号に対し N_c ポイント逆高速フーリエ変換 (IFFT) を適用して時間領域信号に変換した後、サイクリックプレフィックス (CP) を挿入して送信する。

以降説明の都合上、第 u ユーザを希望ユーザとして第 u' ユーザを第 u ユーザに干渉を与えるユーザとして説明する。BS は各アンテナの受信信号から ($n_r = 0, \dots, N_r$) CP を除去した後、 N_c ポイント FFT を適用して周波数領域信号に変換し、デマッピングを行う。次いで MUI および ISI を抑制するために簡易 MMSE-FDE を適用する。FDE 後の第 u ユーザの受信信号 $\{\hat{R}_u(k); k=0, \dots, M-1\}$ は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \hat{R}_u(k) &= \sum_{n_r=0}^{N_r-1} W_{u,n_r}(k) R_{u,n_r}(k) \\ &= \sqrt{P_{r,u}} \hat{H}_u(k) S_u(k) + \sum_{u'=0, u' \neq u}^{U_\delta-1} \sqrt{P_{r,u'}} \hat{H}_{u'}(k) S_{u'}(k) + \hat{N}_u(k) \end{aligned} \quad (1)$$

ここで $R_{u,n_r}(k)$ は第 u ユーザに対するデマッピング後の第 n_r アンテナ周波数領域受信信号であり、 $W_{u,n_r}(k)$ は MMSE-FDE 重みである。第 u ユーザに対する第 n_r アンテナにおける FDE 重みは次式で与えられる [8]。

$$W_{u,n_r}(k) = \frac{P_{r,u} H_{u,n_r}^*(k)}{\sum_{u'=0}^{U_\delta-1} P_{r,u'} |H_{u',n_r}(k)|^2 + N} \quad (2)$$

ただし $H_{u,n_r}(k)$ は第 u ユーザ-BS 第 n_r アンテナ間のチャネルの伝達関数である。また、 $N = N_0/T_s$ は雑音電力であり、 N_0 は片側雑音電力スペクトル密度比、 T_s はシンボル長を表している。 $P_{r,u}$ は BS における第 u ユーザの受信信号電力であり、次式で与えられる。

$$P_{r,u} = \bar{P}_i \cdot r_u^{-\alpha} \cdot 10^{-\eta/10} \quad (3)$$

ここで、 $\bar{P}_i = P_i \cdot R^{-\alpha}$ はセル半径 R で正規化されたユーザの送信電力であり、 P_i はユーザの送信電力である。また $r_u = R_u/R$ は第 u ユーザ-BS 間の正規化距離であり、 α, η はそれぞれ、伝搬損失指数およびシャドウイングの標準偏差を示している。また $S_u(k)$ は第 u ユーザの周波数領域送信信号である。 $\hat{H}_u(k)$ および $\hat{N}_u(k)$ はそれぞれ FDE 後の等価チャネル利得および等価雑音であり、次式で与えられる。

$$\begin{cases} \hat{H}_u(k) = \sum_{n_r=0}^{N_r-1} W_{u,n_r}(k) H_{u,n_r}(k) \\ \hat{N}_u(k) = \sum_{n_r=0}^{N_r-1} W_{u,n_r}(k) N_{u,n_r}(k) \end{cases} \quad (4)$$

最後に $\hat{R}_u(k)$ に対して M ポイント逆離散フーリエ変換 (IDFT) を適用して時間領域信号に変換した後、データ復調を行う。

SC-FDMA/SDMA 伝送における第 u ユーザのチャンネル容量 C_u は次式で表される [8]。

$$C_u = \frac{M}{N_c} \log_2(1 + \gamma) \quad (5)$$

ここで、 γ は第 u ユーザの FDE 後の受信 SINR であり、次式で与えられる [8]。

$$\gamma = \frac{\frac{P_{r,u}}{MN} \left| \sum_{k=0}^{N_c-1} \varepsilon_u(k) \hat{H}_u(k) \right|^2}{\left[\sum_{u'=0}^{U_c-1} \frac{P_{r,u'}}{N} \sum_{k=0}^{N_c-1} \varepsilon_{u'}(k) \left| \hat{H}_{u'}(k) \right|^2 - \frac{P_{r,u}}{MN} \left| \sum_{k=0}^{N_c-1} \varepsilon_u(k) \hat{H}_u(k) \right|^2 \right] + \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{n_r=0}^{N_r-1} |W_{u,n_r}(k)|^2} \quad (6)$$

ただし $\varepsilon_u(k)$ ($k=0, \dots, N_c-1$) は第 u ユーザに第 k サブキャリアが割り当てられたかを示す指標であり、信号送信のために第 k サブキャリアが割り当てられた場合は $\varepsilon_u(k)=1$ 、そうでない場合は $\varepsilon_u(k)=0$ となる。分母の第 1 項は残留 ISI および残留 MUI を表し、第 2 項は雑音成分である。

3. SC-FDMA/SDMA における変形 Max-map スケジューリング

以前筆者らは SC-FDMA 伝送を対象とした同時接続ユーザ数可変スケジューリングを提案し、同時接続ユーザ数可変スケジューリングを用いることでチャンネル容量と公平性のトレードオフを制御可能であることを明らかにした [7]。本稿では、さらなるチャンネル容量の増大を図りつつ、チャンネル容量と公平性のトレードオフを制御するために、複数の受信アンテナを用いて複数のユーザを空間多重させるシングルキャリア周波数空間分割マルチアクセス (SC-FDMA/SDMA) を対象とした変形 Max-map スケジューリング (変形 Max-map) を提案する。

3.1. 変形 Max-map

SC-FDMA/SDMA では、各サブキャリアに対して複数のユーザを多重させるため、ユーザ間干渉が発生する。そのため、多重させるユーザは他のユーザに与える影響を考慮しなければならない。そこで、変形 Max-map では、はじめに SC-FDMA のための同時接続ユーザ数可変 Max-map を適用した後、前段階で選択されたユーザとの合計チャンネル容量を最大とするユーザを多重させる。以上の操作を空間多重数分繰り返す。

図 4 に変形 Max-map スケジューリングアルゴリズムのフローチャートを示す。ただし $C'_u(k); (k \in S_u)$ は第 u ユーザに第 k サブキャリア ($k \in S_u$) が割り当てられた場合のチャンネル容量を示している。

また、 S_d はリソース割り当て可能なサブキャリアの集合、 S_u はユーザ u に割り当てられたサブキャリアの集合を示す。 L は第 L 段階のユーザ選択およびリソース割り当てであることを示すインデックスである。変形 Max-map の手順を以下に示す。

- ◆ 第 1 段階のサブキャリア割り当て
- Step1: 割り当て可能なサブキャリア S_d に対して Max-map アルゴリズムを適用。割り当て可能なサブキャリアに対してチャンネル容量が最大となる第 u' ユーザにそのサブキャリアを割り当てる。

$$u' = \arg \max_{u \in Q_d} |H_u(k)|^2 \quad \text{for } k = 0, \dots, N_c - 1 \quad (7)$$

- Step2(a): ユーザ選択
リソース割り当てが完了していないユーザ集合 Q_d の中からチャンネル容量を最大とする第 u_{MAX} ユーザを選択する。

$$u_{MAX} = \arg \max_{u \in Q_d} C'_u(k); (k \in S_u) \quad (8)$$

$$Q_d = Q_d - \{u_{MAX}\}.$$

- Step3(a): 選択されたユーザのサブキャリア数の調整
割り当て可能なサブキャリア集合 S_d を全て第 u_{MAX} ユーザに割り当てる。その後、あるサブキャリアを第 u_{MAX} ユーザから取り除き、第 v ユーザ (取り除いたサブキャリアに対するチャンネル容量が第 u_{MAX} ユーザ以外で最大となるユーザ) に割り当てた場合の合計チャンネル容量の劣化量をそれぞれ計算し、劣化量を最小とする第 k' サブキャリアを選択する。

$$k' = \arg \min_{k \in S_d} C'_{u_{MAX}}(k); (k \in S_d) - \left\{ C'_{u_{MAX}}(k); (k \in S_d - \{k'\}) + C'_v(k); (k \in S_v + \{k'\}) \right\} \quad (9)$$

選択された第 k' サブキャリアを第 u_{MAX} ユーザから取り除く ($S_{u_{MAX}} = S_{u_{MAX}} - \{k'\}, S_d = S_d + \{k'\}$)。

ユーザ u_{MAX} に割り当てられているサブキャリア数 $\text{No}(S_{u_{MAX}})$ が M になるまで Step3(a) を繰り返す。

第 1 段階のリソース割り当てが完了する ($\text{No}(S_d)=0$) まで Step1~3(a) を繰り返す。

- ◆ 第 2 段階以降のサブキャリア割り当て
- Step2(b): ユーザ選択
リソース割り当てが完了していないユーザ Q_d の中から割り当て可能なサブキャリアを全て割り当てたときの合計チャンネル容量を最大とする第 u_{MAX} ユーザを選択する。

$$u_{MAX} = \arg \max_{u' \in Q_d} \sum_{u=0, u \neq u'}^{U-1} C'_u(k); (k \in S_u) + C'_{u'}(k); (k \in S_d) \quad (10)$$

$$Q_d = Q_d - \{u_{MAX}\}.$$

- Step3(b): 選択されたユーザのサブキャリア数の調整

割り当て可能なサブキャリア S_d を全て第 u_{MAX} ユーザに割り当てる。その後、あるサブキャリアを第 u_{MAX} ユーザから取り除いたときの合計チャンネル容量の劣化量をそれぞれ計算し、劣化量を最小とする第 k' サブキャリアを選択する。

$$k' = \arg \min_{k \in S_d} \left\{ \sum_{u=0, u \neq u'}^{U-1} C'_u(k''); (k'' \in S_u) + C'_{u_{MAX}}(k''); (k'' \in S_d) \right\} - \left\{ \sum_{u=0, u \neq u'}^{U-1} C'_u(k''); (k'' \in S_u) + C'_{u_{MAX}}(k''); (k'' \in S_d - \{k\}) \right\} \quad (11)$$

選択した第 k' サブキャリアを第 u_{MAX} ユーザから取り除く。 ($S_{u_{MAX}} = S_{u_{MAX}} - \{k'\}$, $(S_d = S_d + \{k\})$). 第 u_{MAX} ユーザに割り当てられているサブキャリア数 $\text{No}(S_{u_{MAX}})$

が M になるまで Step3(b) を繰り返す。

各段階のリソース割り当てが完了する ($\text{No}(S_d)=0$) まで Step2(b), Step3(b) を繰り返す。各段階のリソース割り当てが終了後、割り当て可能なサブキャリア S_d を初期化する ($S_d = \{0, 1, \dots, N_c - 1\}$). 以上の操作を空間多重数分繰り返した後、すべてのサブキャリア割り当てを完了する。

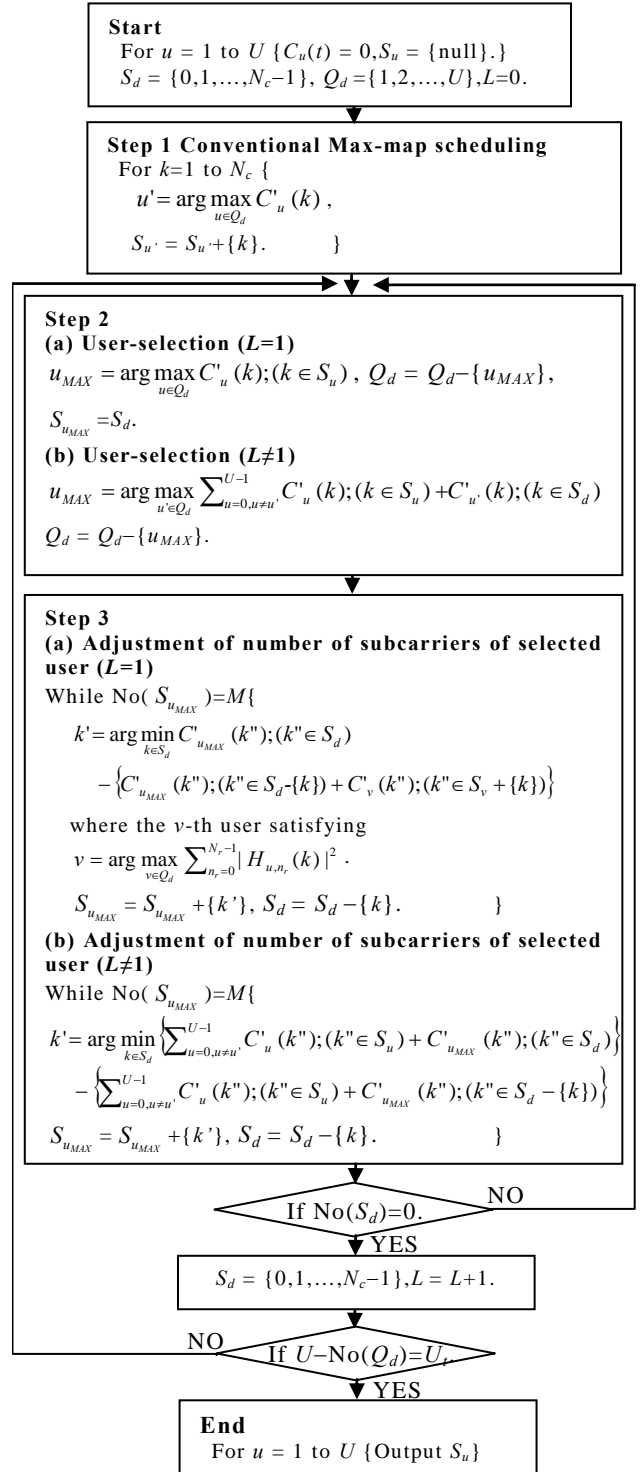


図4 変形 Max-map アルゴリズム

4. 計算機シミュレーション

変形 Max-map を用いた場合のチャンネル容量および Fairness index[9] を計算機シミュレーションにより求めた。ここで Fairness index F を次式のように定義する。

$$F = \frac{\left(\sum_{u=0}^{U-1} \bar{C}_u \right)^2}{U \cdot \sum_{u=0}^{U-1} \bar{C}_u^2} \quad (12)$$

チャンネル容量(Fairness index)の累積分布関数(CDF)を測定し, CDF $x\%$ 値を $x\%$ アウテージ容量(Fairness index)と定義している.

各数値計算条件を表 1 に示す. 等電力遅延プロファイルを有する $L=16$ パス周波数選択性ブロックレイリーフェージングを仮定し, 伝搬損失指数 α およびシャドウイング標準偏差 η をそれぞれ $\alpha=3.5$, $\eta=8.0(\text{dB})$ と仮定する. 全ユーザ数 U を $U=128$ とする.

表 1 数値計算条件

Fading type	Block Rayleigh fading
Power delay profile	Uniform
No. of paths	$L=16$
Time delay	$\tau = l, l=0 \sim L-1$
No. of users	$U=128$
Total no. of subcarriers	$N_c=128$
No. of active users	$U_i=1,2,4,8,16,32,64,128$
Path loss exponent	$\alpha=3.5$
Shadowing loss standard deviation	$\eta=8.0(\text{dB})$
Normalized transmit SNR	$\bar{P}_t=10(\text{dB})$

変形 Max-map を用いる場合において, 空間多重数 U_δ をパラメータとしたときの同時接続ユーザ数対 10% アウテージ合計チャンネル容量特性を図 5 に示す. ただし受信アンテナ本数は $N_r=8$ としている. 図 5 より, 同時接続ユーザ数 U_i が小さい場合は, 空間多重数 U_δ が大きくなるにつれ合計チャンネル容量が増大することが分かる. これは, 空間多重ユーザ数が増えるほど, 1 ユーザ当りのサブキャリア数が増えるためである. ただし, 空間多重数が大きくなるにつれ, アンテナダイバーシチ効果およびスケジューリングによる周波数ダイバーシチ効果が小さくなるため, 合計チャンネル容量の改善量が徐々に小さくなっている. また変形 Max-map を用いる場合において, 空間多重数 U_δ をパラメータとしたときの同時接続ユーザ数対 10% アウテージ Fairness index 特性を図 6 に示す. ただし受信アンテナ本数は $N_r=8$ としている. 図 6 より空間多重数 U_δ を大きくするほど公平性が劣化することが分かる. これは, 空間多重数 U_δ を大きくするほど, ユーザ間干渉が増大し, チャンネル状態の悪いユーザのチャンネル容量が極めて小さくなるためであると考えられる.

図 7 に変形 Max map において合計チャンネル容量および Fairness index が最大となるように適応的に空間多重数を変化させた場合の 10% アウテージ Fairness index 対 10% アウテージ合計チャンネル容量特性を, U_i を変化させたときの結果を示す. 比較のため, SC-FDMA ($N_r=1$) における同時接続ユーザ数可変 Max-map を行った場合の特性も図 7 に示す. 図 7 より, 合計チャンネル容量が最大となるように空間多重数を選択した場合は SC-FDMA よりも高いチャンネル容量が達成できることが分かる. しかしながら, 空間多重させる分ユーザ間

干渉の影響で, チャンネル状態の悪いユーザのチャンネル容量が劣化するため, 公平性が低くなっている. 一方, 公平性が最大となるように空間多重数を選択した場合は SC-FDMA に比べて常に高い合計チャンネル容量と公平性が得られることがわかる. これはアンテナダイバーシチ効果によるものだと考えられる. したがって, チャンネル容量と公平性のトレードオフを制御しつつさらなるチャンネル容量の増大を実現する場合は, 公平性を最大とするように空間多重数を選択した方が良いといえる.

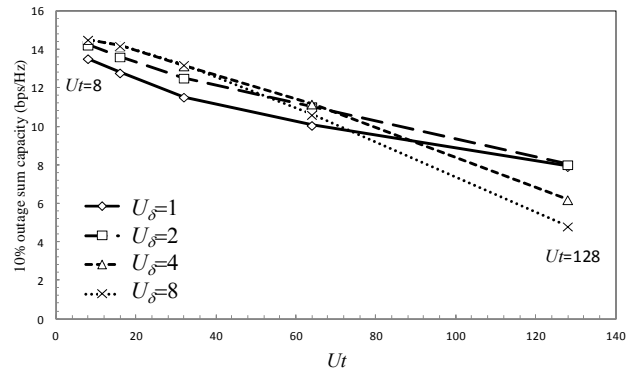


図 5 同時接続ユーザ数対 10% アウテージ合計チャンネル容量特性 ($N_r=8$)

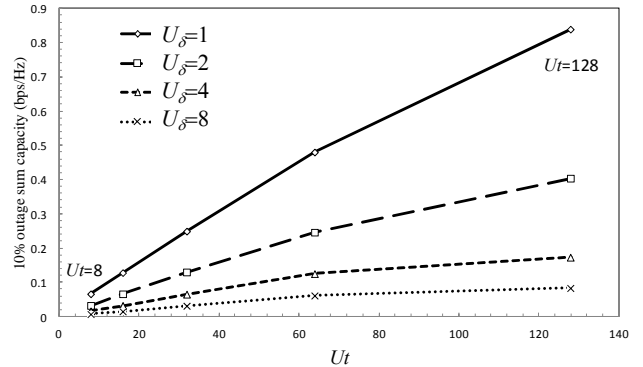


図 6 同時接続ユーザ数対 10% アウテージ Fairness index 特性 ($N_r=8$)

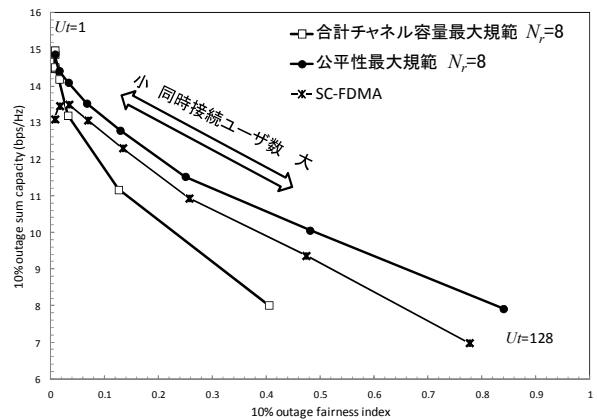


図 7 10% アウテージ Fairness index 対 10% アウテージ合計チャンネル容量特性 ($N_r=8$)

5. むすび

本稿では、上りリンク SC-FDMA/SDMA 伝送を対象に、同時接続ユーザ数を制御可能とする変形 Max-map を提案し、計算機シミュレーションにより、同時接続ユーザ数および空間多重数が合計チャネル容量および公平性に与える影響を明らかにした。その結果、公平性を最大とするように空間多重数を選択する Max-map を SC-FDMA/SDMA に適用することで、チャネル容量を公平性のトレードオフを制御できることを明らかにした。

文 献

- [1] J.G. Proakis, *Digital communications*, 4th ed., McGraw-Hill, 2001.
- [2] R. Prasad, *OFDM for wireless communications systems*, Artech House, 2004.
- [3] J. Armstrong, "New OFDM peak-to-average power reduction scheme," Proc. IEEE 54th Veh. Technol. Conf. (VTC), vol.1, pp.756-760, Rhodes, Greece, May 2001.
- [4] H.G. Myung, J. Lim, and D. J. Goodman, "Single carrier FDMA for uplink wireless transmission," IEEE Trans. Veh. Technol., vol.1, no.3, pp.30-38, Sept. 2006.
- [5] T.W. Ban, W. Choi, B.C. Jung, and D. K. Sung, "Multi-user diversity in a spectrum sharing system," IEEE Trans. Wireless Commun., vol.8, no.1, pp.102-106, Jan.2009.
- [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] T. Iwata, K. Kimura, H. Miyazaki, T. Obara and F. Adachi, "Capacity-Fairness Controllable Scheduling for Uplink Single-carrier," 2013 IEEE 78th Vehicular Technology Conference (VTC2013-Fall), Las Vegas, USA, 2-5 Sept. 2013.
- [8] A. Mehbodniya and F. Adachi, "Radio Resource Management for Multiuser SC-FDMA/SDMA Transmission," IEICE Technical Report, RCS2013-173, pp.181-186, Oct.2013.
- [9] R. Jain, D. dhiu, and W. Hawa, "A quantitative measure of fairness and discrimination for resource allocation in shared computer systems," DEC Tech. Report TR-301, Sept. 1984. Available: <http://www1.cse.wustl.edu/~jain/papers/ftp/fairness.pdf> .