

上りリンク SC-FDMA におけるサブキャリアブロック化を用いた ユーザスケジューリング

岩田 隆芳[†] 木村 和裕[†] 宮崎 寛之[†] 小原 辰徳[†] 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, kazuhiko, miyazaki, obara}@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ユーザスケジューリング法(従来法と呼ぶ)を提案した。しかしながら、従来法ではサブキャリア毎にリソース割り当てを行っているため、送信信号のピーク対平均電力比(PAPR)が増大してしまう。SC 信号のスペクトルを連続する複数のサブキャリアで構成されるサブキャリアブロックに分割し、ブロック単位で割り当てを行えば、PAPR の増大を抑えられる。そこで本稿では、サブキャリアブロック単位でリソース割り当てを行うユーザスケジューリング法について検討する。サブキャリアブロックを構成するサブキャリア数を変化させた場合のチャンネル容量、公平性および PAPR 特性を計算機シミュレーションにより求め、サブキャリアブロックを構成するサブキャリア数がスケジューリングに与える影響について考察している。

キーワード SC-FDMA, スケジューリング

User Scheduling for Uplink SC-FDMA with Subcarrier-Blocking

Takayoshi IWATA[†] Kazuhiro KIMURA[†] Hiroyuki MIYAZAKI[†] Tatsunori OBARA 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 Previously, we proposed the scheduling methods so as to select a constant number of simultaneous multi-access users for uplink SC-FDMA. However, peak-to-average ratio gets increase because we assumed that we carried out the scheduling methods on each subcarrier. If we carried out the scheduling methods on each subcarrier block which are composed of sequence subcarriers, the restraining of increase of PAPR is expected. In this paper, we discuss the scheduling methods which allocate on each subcarrier. We evaluate, by the computer simulation, the sum capacity, the fairness among users, and PAPR using the modified scheduling methods. We discuss the impact of the number of subcarriers in a subcarrier block on scheduling.

Keyword SC-FDMA, 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フェージングチャンネルの周波数選択性が無視できなくなる。直交周波数分割マルチアクセス(OFDMA)[1]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)が非常に高く、線形電力増幅器の負担が大きくなるという問題がある。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)[2]に注目している。SC-FDMA は、3GPP LTE の上りリンクのマルチアクセス方式として採用されている[2]。これまでに筆者らは、マルチユーザ環境における SC-FDMA を対象にマルチユーザスケジューリングの検討を行ってきた。

マルチユーザ環境では、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法の導入が必

要である。スケジューリング法の導入により、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る。スケジューリング法として、合計チャンネル容量を最大化させる Max map スケジューリング[4]、合計チャンネル容量と公平性とのトレードオフを実現するプロポーションアルファ(PF map)スケジューリング[5, 6]が盛んに検討されてきた。以前筆者らはシステムのチャンネル容量および公平性を制御するため、同時接続ユーザ数を任意に選択可能な Max map スケジューリングおよび PF map スケジューリングを提案した[7]。これにより、同時接続ユーザ数がユーザあたりのチャンネル容量、合計チャンネル容量および公平性に与える影響について示した。

しかしながら、[7]の提案法では、ユーザの SC 信号スペクトルを 1 サブキャリア毎にリソースに割り当てるため、送信信号の PAPR が増大してしまう。SC 信号スペクトルを連続する複数のサブキャリアで構成されるサブキャリアブロックに分割し、ブロック単位で割

り当てを行えば、送信信号波形の歪を抑制し、PAPRの増大を抑えることが期待できる。

本論文では、上りリンクマルチユーザ SC-FDMA を対象とし、サブキャリアブロック単位でのリソース割り当てを行う変形 Max map および PF map スケジューリング法を提案する。そして、提案スケジューリング法を用いた場合の合計チャネル容量、公平性および PAPR 特性を計算機シミュレーションにより明らかにする。

本論文の構成は以下のようになっている。2章にて上りリンク SC-FDMA 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章では従来の Max map, PF map スケジューリング法を示し、4章にて提案スケジューリング法について述べる。5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、公平性および PAPR 分布を明らかにする。6章にてまとめる。

2. システムモデル

上りリンク SC-FDMA 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いる。セル半径が R の円形セルを仮定し、端末 (MT)-基地局 (BS)間の距離を $R_{u,M-B}$ とする。ただし u はユーザのインデックスである。

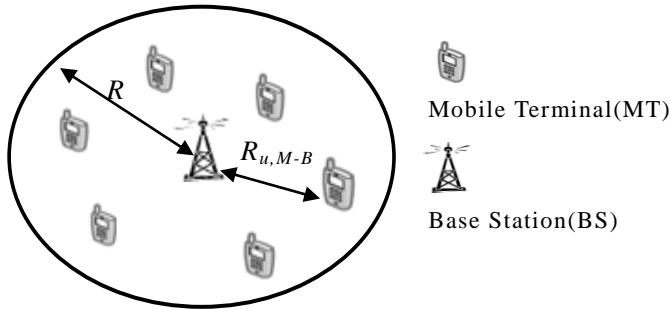


図1 システムモデル

セル内の全ユーザ数を U とし、スケジューリングによって、同時接続ユーザを U_t 人選択し SC-FDMA 伝送を行う。総サブキャリア数を N_c 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 ($M=N_c/U_t$)。

ユーザ u が SC-FDMA 伝送を行うときのチャネル容量 C_u は次式で表される[3]。

$$C_u = \frac{1}{N_c} \sum_{k=0}^{N_c-1} C_u(k) = \frac{1}{N_c} \sum_{k=0}^{N_c-1} \varepsilon_u(k) \log_2 \left(1 + \frac{P_{r,u,M \rightarrow B}}{N} |H_u(k)|^2 \right), \quad (1)$$

ここで、 $C_u(k)$ は第 k サブキャリアに対するユーザ u のチャネル容量である。 $H_u(k)$ は MT-BS 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。 $P_{r,u,M \rightarrow B}$ は BS の受信電力であり、次式で与えられる。

$$P_{r,u,M \rightarrow B} = \bar{P}_{t,M} \cdot r_{u,M \rightarrow B}^{-\alpha} \cdot 10^{-\eta/10}, \quad (2)$$

ここで、 $\bar{P}_{t,M} = P_{t,M} \cdot R^{-\alpha}$ はセル半径 R で正規化された端末の送信電力であり、 $P_{t,M}$ は端末の送信電力である。

$r_{u,M \rightarrow B} = R_{u,M \rightarrow B}/R$ は MT-BS 間の正規化距離である。 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。式(1)における $\varepsilon_u(k)$ ($k=0, \dots, N_c-1$) はユーザ u 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。

3. 従来のスケジューリング法

スケジューリングを行う上でよく知られたリソース割り当て法として Max map[4] および PF map[5,6] がある。以下にそれぞれのスケジューリングアルゴリズムを示す。

3.1 Max map

Max map はシステムの合計チャネル容量を最大とするスケジューリング法であり、第 k サブキャリアに対してユーザ u のチャネル利得 $|H_u(k)|^2$ が最大のユーザにそのリソースを割り当てる[4]。リソース割り当ては次式の最適化問題に基づいて行われる。

$$\max \sum_{u=1}^U C_u, \quad (3)$$

フローチャートは図2のようになる。ここで U はセル内に存在する全ユーザ数、 C_u はユーザ u の瞬時チャネル容量、 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表す。 S_d はリソース割り当てが完了していないサブキャリアの集合を示しており、 Q_d はリソース割り当てが完了していないユーザの集合、 $C_u(k)$ はサブキャリア k に対するユーザ u の瞬時チャネル容量を示す。 $No(x)$ は集合 x の要素の個数を示す。

3.2 PF map

PF map は合計チャネル容量と公平性のトレードオフを実現するスケジューリング法である。リソース割り当ては次式の最適化問題に基づいて Max map と同様のアルゴリズムで行われる。

$$\max \sum_{u=1}^U \sum_{k=1}^{N_c} C_{norm,u,k}(t), \quad (4)$$

PF map スケジューリングでは各サブキャリアの正規化チャネル容量 $C_{norm,u,k}(t)$ を最大とするユーザにそのサブキャリアを割り当てる。正規化されたチャネル容量 $C_{norm,u,k}(t)$ は次式で表される[5,6]。

$$C_{norm,u,k}(t) = \frac{C_{u,k}(t)}{C_u(t)}, \quad (5)$$

ここで $\bar{C}_u(t)$ は平均チャネル容量であり次式で計算される。

$$\bar{C}_u(t) = \begin{cases} \left(1 - \frac{1}{T_c}\right) \bar{C}_u(t-1) & u \neq \text{selected user} \\ \left(1 - \frac{1}{T_c}\right) \bar{C}_u(t-1) + \frac{1}{T_c} C_u(t) & u = \text{selected user} \end{cases}, \quad (6)$$

ただし、 T_c は平均区間である。

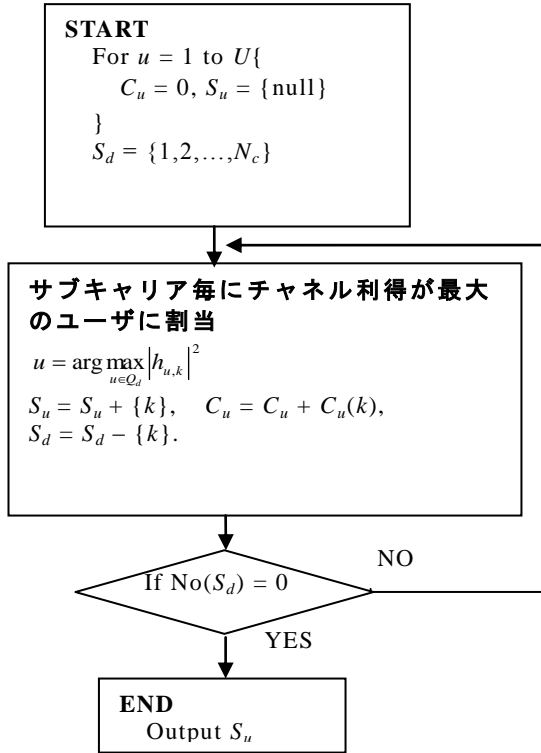


図 2 従来の Max map アルゴリズム

4. サブキャリアブロック化を用いた同時接続ユーザ数を制御可能とするスケジューリング法

以前筆者らは同時接続ユーザ数がシステムのチャネル容量および公平性に与える影響を示すために同時接続ユーザ数を制御可能とするスケジューリング法を提案した[7]。しかしながら、[7]の提案法ではユーザの SC 信号スペクトルを全分割し、サブキャリア単位でスケジューリングを行っていた ($D=M$; D は SC スペクトルの分割数)。しかしながら、連続する複数のサブキャリアで構成されるサブキャリアブロック単位でスケジューリングを行った場合 ($D<M$)、送信信号波形の歪を抑制し、PAPR の増大を抑えられることが予想される。そこで本稿では、サブキャリアブロックを構成するサブキャリア数 (M/D) が合計チャネル容量、公平性および PAPR に与える影響を考察するため、サブキャリアブロック化を用いた同時接続ユーザ数を制御可能とする Max map, PF map スケジューリングを提案する。サブキャリアブロック化の例 ($N_c=16, M=8, D=4$) を図 3 に示す。ここで黒く塗られているサブキャリアはユーザに割り当てられるサブキャリアを示す。

4.1 提案 Max map

従来の Max map アルゴリズムではユーザのチャネル状態に応じて同時接続ユーザ数が変化する。したがって、同時接続ユーザ数を任意に選択可能とするには従来のアルゴリズムにユーザ選択の動作とサブキャリア数を調節する動作が必要となる。また、サブキャリアブロックを構成するサブキャリア数の影響を調べるためにサブキャリアブロック化の動作を加える。図 4 にサブキャリアブロック化を用いた同時接続ユーザ数を任意

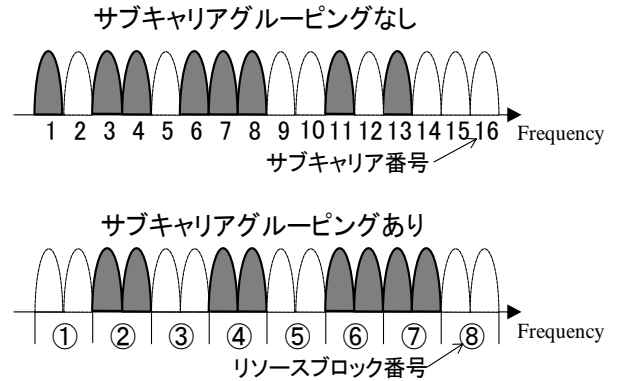


図 3 サブキャリアグルーピング ($N_c=16, M=8, D=4$)

に選択可能とする Max map アルゴリズムのフローチャートを示す。ここで $H'_u(k')$ および $C'_u(k')$ はユーザ u において第 k' サブキャリアブロックを構成するサブキャリアに対するチャネル利得の和およびチャネル容量の和を示す。また、 S'_d はリソース割り当てが完了していないサブキャリアブロックの集合、 S'_u はユーザ u に割り当てられたサブキャリアブロックの集合を示す。変形 Max map の手順を以下に示す。

- Step 1: サブキャリアブロック化を行う。
- Step 2: 従来の Max map アルゴリズムを行う。
- Step 3: リソース割り当てが完了していないユーザ Q_d の中からチャネル容量が最も大きいユーザ u' を選択する。

$$u' = \arg \max_{u \in Q_d} C_u, \quad (7)$$

この時、ユーザ u' を Q_d から取り除く ($Q_d = Q_d - \{u'\}$)。

(i) $No(S_{u'})$ が M より大きい場合、選択されたユーザ u' に割り当てられているサブキャリアブロック $S'_{u'}$ の中からチャネル利得が最小となるサブキャリアブロック k' を選択する。

$$k' = \arg \min_{k' \in S'_{u'}} |H'_{u'}(k')|^2, \quad (8)$$

選択された k' をユーザ u' から取り除く ($S'_{u'} = S'_{u'} - \{k'\}$)。 k' に対してチャネル容量が最大となるユーザ v ($v \in Q_d$) を選択する。

$$v = \arg \max_{v \in Q_d} H'_v(k'), \quad (9)$$

k' をユーザ v に割り当てる ($S'_v = S'_v + \{k'\}$)。ユーザ u' に割り当てられているサブキャリア数 $No(S_{u'})$ が M になるまで (i) を繰り返す。

(ii) $No(S_{u'})$ が M より小さい場合、他のユーザの集合 ($Q_d - u'$) の中からユーザ u' のチャネル容量が最大となるサブキャリアブロック k' ($k' \in S'_d - S'_{u'}$) を選択する。

$$k' = \arg \max_{k' \in S'_d - S'_{u'}} |H'_{u'}(k')|^2, \quad (10)$$

k' が割り当てられていたユーザ v から k' を取り除き ($S'_v = S'_v - \{k'\}$)、 k' をユーザ u' に割り当てる ($S'_{u'} = S'_{u'} + \{k'\}$)。

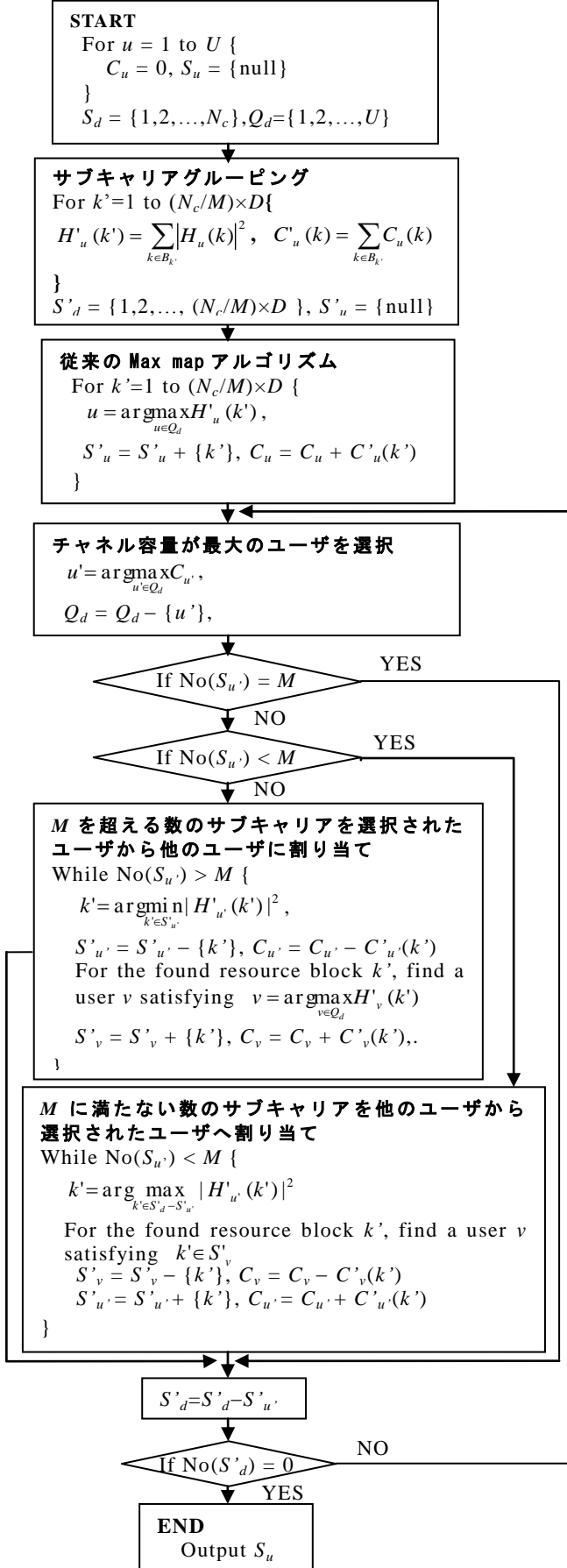


図4 提案 Max map アルゴリズム

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

Step 4: 全サブキャリアブロックのリソース割り当てが完了するまで Step 3 を繰り返す。

4.2 提案 PF map

変形 PF map スケジューリングは変形 Max map スケジューリングと同様の操作を行う。ただし、変形 Max map アルゴリズム内で行われる従来の Max map アルゴリズムの部分において使用される $|H'_u(k)|^2$ の代わりに式(5)の正規化チャンネル容量 $C_{norm,u,k}(t)$ を用いてスケジューリングを行う。

5. 計算機シミュレーション

計算機シミュレーションにより、チャンネル容量および Fairness index[8]の累積分布関数、PAPRの相補累積分布関数 (CCDF) を求めた。ここで Fairness index F を次式のように定義する。

$$F = \frac{\left(\sum_{u=0}^{U-1} C_u \right)^2}{U \cdot \sum_{u=0}^{U-1} C_u^2} \quad (11)$$

また、チャンネル容量 (Fairness index) の累積分布関数 (CDF) を測定し、CDFx% 値を x% アウテージ容量 (Fairness index) と定義している。PAPR は送信信号 $s(t)$ を用いて次式で定義される [9]。

$$\text{PAPR} = \frac{\max \{|s(t)|^2\}_{t=0 \sim N_c-1}}{E\{|s(t)|^2\}} \quad (12)$$

シミュレーションモデルについて示す。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 MT 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	$U_i=2, 4, 8, 16, 32, 64, 128$
Path loss exponent	$\alpha=3.5$
Shadowing loss standard deviation	$\eta=8.0(\text{dB})$

5.1 アウテージ容量

図5に変形 Max map を用いた場合の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において、同時接続ユーザー数 U_i およびサブキャリアブロックを構成するサブキャリア数 M/D を変化させた場合の結果を示す。図5より、変形 Max map においてサブキャリアブロックを構成するサブキャリア数 M/D が大きくなると、合計チャンネル容量が劣化することが分かる。この理由は以下のように考えられる。変形 Max map はチャンネル状態の良いユーザーに優先的にサブ

キャリアブロックが割り当てられる。 M/D が小さい場合、チャンネル利得の高いサブキャリアばかり割り当てられることになるが、 M/D が大きくなるとサブキャリアブロックに利得の低いサブキャリアが含まれる確率が大きくなるのでチャンネル状態の良いユーザの周波数ダイバーシチ効果が小さくなり、合計チャンネル容量が劣化すると考えられる。しかしながら、 $M/D=4$ までなら合計チャンネル容量の劣化が小さいことが分かる。これは、同一のユーザに対して隣り合うサブキャリアのチャンネル利得は相関が大きいため、 M/D が小さくてもサブキャリアが連続して割り当てられる確率が大きい。よって、 M/D が小さい場合、サブキャリアブロック化の影響は小さくなくなると考えられる。

図 6 に変形 PF map における 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示す。図 6 より、 M/D が大きくなると公平性が劣化することが分かる。これは、PF map スケジューリングは瞬時のダイバーシチ利得が高いサブキャリアブロックがユーザに割り当てられるが、 M/D が大きくなるとサブキャリアブロックに対するチャンネル利得が平均化してしまい、最適なリソース割り当てが行われなためであると考えられる。しかしながら、 $M/D=4$ までであれば公平性の劣化は小さいことが分かる。また、合計チャンネル容量においては、同時接続ユーザ数に関わらず、サブキャリアブロックを構成するサブキャリア数 M/D の影響が小さいことが分かる。

5.2 PAPR 分布

図 7 にサブキャリアブロック化を用いた同時接続ユーザ数を制御可能とする Max map スケジューリング法における PAPR の CCDF を示す。変調方式は QPSK 変調を仮定している。尚、提案 PF map の CCDF も図 7 と一致する。図 7 より、リソースブロックを構成するサブキャリア数 M/D が大きくなるほど PAPR を低く抑えられることが分かる。これは、 M/D が大きいほど連続したサブキャリアがユーザに割り当てられることで送信信号波形の歪を防ぎ、送信信号電力のピーク値が小さくなるためであると考えられる。図 5、図 6 および図 7 より、リソースブロックを構成するサブキャリア数が $M/D=4$ までの場合、サブキャリアブロック化による合計チャンネル容量および公平性の劣化を防ぎつつ、サブキャリアブロック化を行わない場合 ($M/D=1$) よりも PAPR を低く抑えられることが分かる。

6. むすび

本稿では、上りリンク SC-FDMA 伝送を対象に、サブキャリアブロック化を用いた同時接続ユーザ数を制御可能とするスケジューリング法を提案した。これにより、同時接続ユーザ数が合計チャンネル容量、公平性および PAPR 特性に与える影響を計算機シミュレーションにより明らかにした。この結果、変形 Max map、変形 PF map において、リソースブロックを構成するサブキャリア数を $M/D=4$ まで増加させる際には、サブキャリアグルーピングによる合計チャンネル容量および公平性の劣化が小さく、PAPR を低く抑えられることを示した。

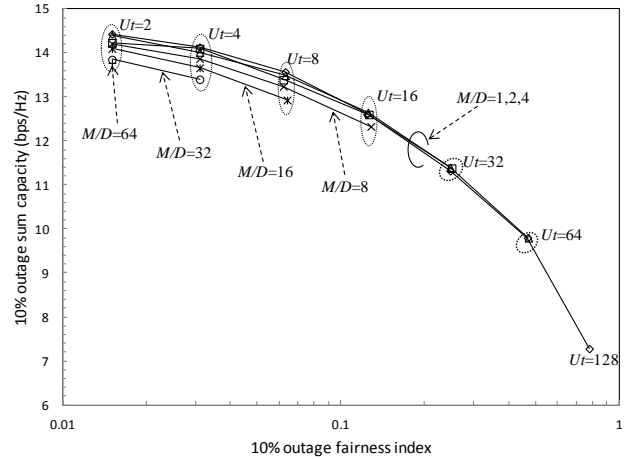


図 5 10% アウテージ合計チャンネル容量対 10% アウテージ Fairness index (変形 Max map)

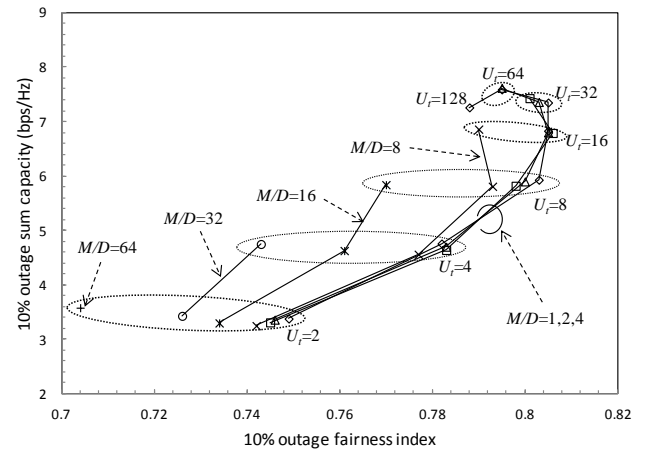


図 6 10% アウテージ合計チャンネル容量対 10% アウテージ Fairness index (変形 PF map)

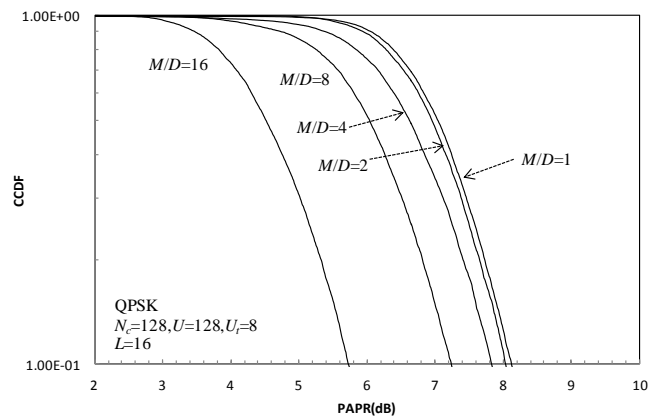


図 7 PAPR 特性

文 献

[1] R. Prasad, OFDM for wireless communications systems, Artech House, 2004.
 [2] Hyung G. Myung, "Introduction To Single Carrier Fdma",

2007 EURASIP, EUSIPCO, Poznan 2007.

- [3] M. Nakada, K. Takeda, and F. Adachi, "Channel Capacity Of SC-FDMA Cooperative AF Relay Using Spectrum Division & Adaptive Subcarrier Allocation," Proc. IC-NIDC 2010, pp.579-583, Sept. 2010.
- [4] H. Matsuda, K. Takeda, 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.
- [5] J. Lim, H. Myung, K. Oh and D. Goodman "Proportional fair scheduling of uplink single-carrier FDMA systems," in Proc. IEEE PIMRC 06, pp. 1-6, 2006
- [6] Rabie Almatarneh, Mohamed Ahmed, Octavia Dobre "Frequency-Time Scheduling Algorithm for OFDMA Systems," in Electrical and Computer Engineering, 2009. CCECE '09.
- [7] 岩田隆芳, 木村和裕, 宮崎寛之, 小原辰徳, 安達文幸, "上りリンク SC-FDMA 協調 AF リレーにおけるスケジューリングに関する検討," 信学技報, RCS2012-85, pp. 61-66, 2012年7月
- [8] R. Jain, D. dhiu, and W. Hawa, "A quantitative measure of fairness and discrimination for resource allocation in shared computer systems," Digital Equipment Corporation, Sept. 1984.
- [9] H. G. Myung, J. Lim, and D. J. Goodman, "Single Carrier FDMA For Uplink Transmission," IEEE Trans. Veh. Technol. , Vol.1, No. 3, pp.30-38, Sep. 2006.