

# 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

岩田 隆芳<sup>†</sup> 木村 和裕<sup>†</sup> 宮崎 寛之<sup>†</sup> 小原 辰徳<sup>†</sup> 安達 文幸<sup>‡</sup>

<sup>†‡</sup>東北大学大学院 工学研究科 電気・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>{iwata, kazuhiko, miyazaki, obara}@mobile.ecei.tohoku.ac.jp, <sup>‡</sup>adachi@ecei.tohoku.ac.jp

**あらまし** 次世代移動無線通信システム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、伝搬損失およびシャドウイング損失によって、セル端付近に存在するユーザの伝送品質は大きく劣化してしまう。この問題を解決する有効な技術が協調リレー通信である。これまで筆者らは、シングルユーザ環境におけるシングルキャリア周波数分割マルチアクセス(SC-FDMA)協調 AF リレー通信について検討してきた。ユーザ数がチャンネル数より多いときには、通信ユーザを選択するスケジューリングが必要である。よく知られたスケジューリング法に Max map, Max min および PF map がある。これらを用いた時の同時接続ユーザ数は、チャンネル変動によって変動してしまう。本論文では、上りリンク SC-FDMA 協調 AF リレー通信を対象に、同時接続ユーザ数を制御できるスケジューリング法を提案し、合計チャンネル容量、ユーザあたりのチャンネル容量、および公平性について検討している。

キーワード 協調リレー, SC-FDMA, スケジューリング

## A Study of Scheduling for Uplink SC-FDMA Cooperative AF relay

Takayoshi IWATA<sup>†</sup> Kazuhiro KIMURA<sup>†</sup> Hiroyuki MIYAZAKI<sup>†</sup> Tatsunori OBARA and  
Fumiyuki ADACHI<sup>‡</sup>

<sup>†‡</sup>Dept. of Electrical and Communication Engineering, Graduate School of Engineering, Tohoku University  
6-6-05, Aza-Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai, 980-8579, JAPAN

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

**Abstract** In the next generation mobile communication systems, the high speed data services are demanded. However, because of path loss and shadowing loss, the transmission quality of the user near the cell edge degrades. A cooperative relay is known as one of the efficient solutions for such a problem. In our previous work, we have studied the single-carrier-frequency division multiple access (SC-FDMA) cooperative amplify-and-forward (AF) relay in single user environment. When the number of users exceeds that of channels, the scheduling method which selects simultaneous users is required. The well-known scheduling methods are Max map, Max min, and PF map. However, the number of the simultaneous users is changed because of the channel fluctuation. In this paper, we propose the scheduling methods which can control the number of the simultaneous users for uplink SC-FDMA cooperative AF relay. And we evaluate, by computer simulation, the sum capacity, user capacity, and fairness when using the proposed scheduling methods.

**Keyword** Cooperative relay, 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、移動無線チャンネルは伝搬損失およびシャドウイング損失によって、セル端付近に存在するユーザの伝送品質が極端に低下してしまう。伝搬損失およびシャドウイング損失の影響を軽減する有効な技術が協調リレー通信である[1]。セル内に複数のリレー局(RS)を分散配置し、信号を中継して伝送することでセル端に位置するユーザの伝送品質劣化を救済できる。

一方、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)[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費(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)[3]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[3]。これまで筆者らは、上りリンク SC-FDMA 協調非再生(AF)リレー通信におけるスペクトル分割・適応サブキャリア割当を提案した[4]。スペクトル分割・適応サブキャリア割当では、各ユーザの送信データブロックを DFT により周波数領域信号に変換し、ユーザあたりのチャンネル容量あるいはシステム合計チャンネル容量を最大にするようにシステム帯域内に適応的にマッピングする。これにより、チャンネルの周波数選択性を利用した周波数ダイバーシチ効果を得ることができる。しかしながら、これまでの筆者らの検討ではシングルユーザ環境を仮定してきた。

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[5], 公平性を最大化させる Max min スケジューリング[6], 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ナルフェア (PF map) スケジューリング[7, 8]が盛んに検討されてきた。

本論文では、上りリンクマルチユーザ SC-FDMA 協調 AF リレー通信におけるスケジューリング法について検討する。上記で述べた従来のスケジューリング法は、各ユーザのチャンネル状態が変動するため同時接続ユーザ数も変動してしまう。本論文では、同時接続ユーザ数を制御できる変形 Max map, Max min 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時の合計チャンネル容量、ユーザあたりのチャンネル容量、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 協調リレー伝送のシステムモデルを示し、次いで伝送モデルおよびチャンネル容量を示す。3章では従来の Max map, Max min および PF map スケジューリング法について説明し、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ンネル容量、ユーザあたりのチャンネル容量および公平性を明らかにする。6章にてまとめる。

## 2. システムモデル

SC-FDMA 協調 AF リレーを用いる上りリンク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、セル内に  $K$  個のリレー局 (RS) が分散配置されるものとする。RS-基地局 (BS) 間距離を  $R_{R-B}$  とし、端末 (MT)-BS 間、MT-RS の距離をそれぞれ  $R_{u,M-B}$ ,  $R_{u,M-R}$  とする。ただし  $u$  はユーザのインデックスである。

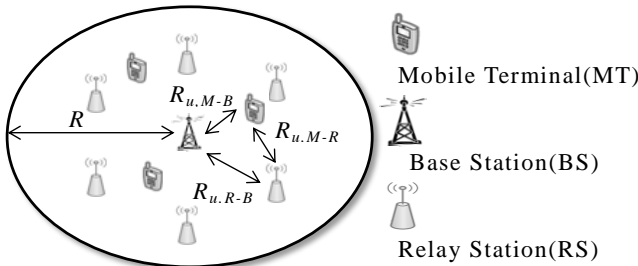


図1 システムモデル

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  $U_i$  人選択し SC-FDMA 協調 AF リレー伝送を行う。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 ( $M=N_c/U_i$ )。また、ユーザの移動速度は低速移動を仮定しており、通信中はフェージングのみ変化し、伝搬損失、シャドウイングは変化しないものとする。

図2に MT および RS の動作を示す。第1タイムスロットにおいて全 MT が RS および BS に送信する。RS

は第1タイムスロットにおける受信信号を増幅した後、第2タイムスロットにおいて BS に送信する。各ユーザにおいて第1タイムスロットと第2タイムスロットで使用されるサブキャリアは等しいとする。

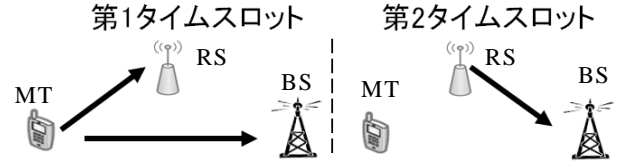


図2 各タイムスロットにおける動作

ユーザ  $u$  が協調 AF リレーを行うときのチャンネル容量  $C_u$  は次式で表される[4]。

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

ここで、 $C_{u,k}$  は第  $k$  サブキャリアに対するユーザ  $u$  のチャンネル容量である。 $H_{u,M \rightarrow B}(k)$  および  $H_{u,M \rightarrow R}(k)$ ,  $H_{u,R \rightarrow B}(k)$  はそれぞれ MT-BS 間および MT-RS 間, RS-BS 間のチャン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。 $P_{r,u,M \rightarrow B}$  および  $P_{r,u,M \rightarrow R}$ ,  $P_{r,u,R \rightarrow B}$  はそれぞれ第1タイムスロットにおける BS および RS, 第2タイムスロットにおける BS の受信電力であり、次式で与えられる。

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

ここで、 $\bar{P}_{t,M} = P_{t,M} \cdot R^{-\alpha}$  および  $\bar{P}_{t,R} = P_{t,R} \cdot R^{-\alpha}$  はそれぞれセル半径  $R$  で正規化された端末およびリレー局の送信電力であり、 $P_{t,M}$  および  $P_{t,R}$  はそれぞれ端末およびリレー局の送信電力である。 $r_{u,M \rightarrow R} = R_{u,M \rightarrow R}/R$  および  $r_{u,R \rightarrow B} = R_{u,R \rightarrow B}/R$  はそれぞれ MT-RS 間および RS-BS 間の正規化距離である。 $\alpha, \eta$  はそれぞれ、伝搬損失指数およびシャドウイング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。本稿では次式のように端末とリレー局の総送信電力を一定とする制約条件を用いる。

$$\bar{P}_{t,M} + \bar{P}_{t,R} = \bar{P}_T \quad (3)$$

## 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サブキャリア割当法として Max map[5], Max min [6] および PF map[7,8]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ン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  $u$  のチャンネル利得  $h_{u,k}$  が最大のユーザにそのサブキャリア割り当てる [5]。フローチャートは図 3 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  $u$  の瞬時チャンネル容量、 $S_u$  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。 $S_d$  はサブキャリア割当が完了していないサブキャリアの集合を示しており、 $Q_d$  はサブキャリア割当が完了していないユーザの集合、 $C_{uk}$  はサブキャリア  $k$  に対するユーザ  $u$  の瞬時チャンネル容量を示す。No( $x$ ) は集合  $x$  の要素の個数を示す。

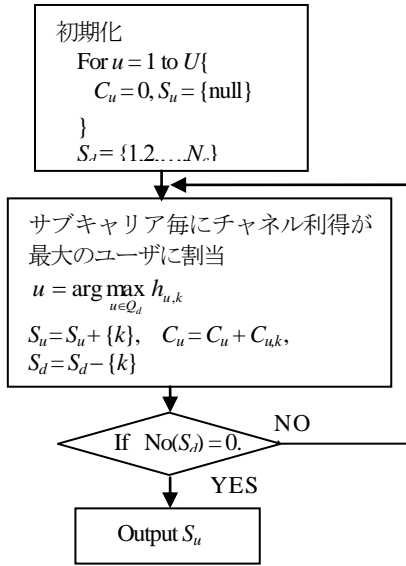


図 3 従来の Max map

### 3.2. Max min

公平性を最大化するには以下の指標に基づいてスケジューリングおよびサブキャリア割当を行う。

$$\max_u \min_{k \in S_u} C_u \quad (4)$$

Subject to

$$S_1, S_2, \dots, S_k \text{ are disjoint,} \quad (5)$$

$$S_1 \cup S_2 \cup \dots \cup S_U \in \{1, \dots, N_c\} \quad (6)$$

本稿では、上式の指標を低演算量で実現する準最適アルゴリズム [6] を用いる。従来の Max min アルゴリズムのフローチャートを図 4 に示す。まず、全てのユーザに対して最も  $h_{u,k}$  の大きいサブキャリアを 1 つ割り当てる。このときユーザ間でサブキャリアが重複した場合は先に割り当てられたユーザを優先する。次に、全ユーザに対して割り当てられたサブキャリアに対する累積チャンネル容量を計算し、累積チャンネル容量が最も小さいユーザに新たに 1 つサブキャリアを割り当てる。以上の操作を全サブキャリアの割り当てが終了するまで繰り返す。なお、この手法は同時接続ユーザ数が総サブキャリア数  $N_c$  に対して小さい場合のみ適用できる。

### 3.3. PF map

PF map は各ユーザのチャンネル容量の公平性を高めることを目的としたサブキャリア割当法である。PF map では各サブキャリアの正規化チャンネル容量  $C'_{u,k}$  を最

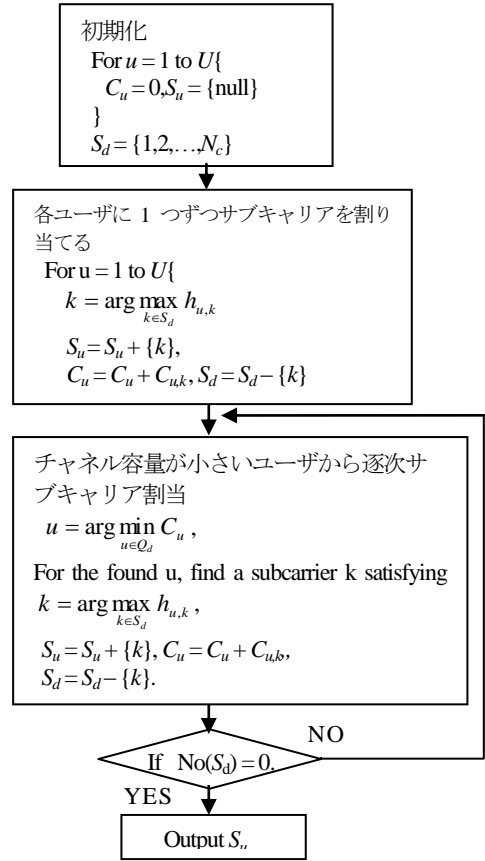


図 4 従来の Max min

大とするユーザにそのサブキャリアを割り当てる。正規化されたチャンネル容量  $C'_{u,k}$  は次式で表される [7,8]。

$$C'_{u,k}(t) = \frac{C_{u,k}(t)}{\bar{C}_u(t)} \quad (7)$$

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

$$\bar{C}_u(t) = \begin{cases} \left(1 - \frac{1}{T_c}\right) \bar{C}_u(t-1) & u \neq \text{selected user} \\ \left(1 - \frac{1}{T_c}\right) \bar{C}_u(t-1) + \frac{1}{T_c} C_u(t) & u = \text{selected user} \end{cases} \quad (8)$$

ただし、 $T_c$  は平均区間である。

## 4. 同時接続ユーザ数制御可能な提案スケジューリング法

従来のサブキャリア割当ではユーザ数もしくはユーザのチャンネル状態に応じて同時接続ユーザ数が変化してしまうため、同時接続ユーザ数が予め決められたシステムにこれらを適用することはできない。そこで本稿では同時接続ユーザ数を制御可能なスケジューリング法を提案する。また、スケジューリング時には近似したチャンネル利得  $h_{u,k}$  で比較を行うこととする。 $h_{u,k}$  は次式で与えられる。

$$h_{u,k} = \min(H_{M \rightarrow R}(k), H_{R \rightarrow B}(k)) \quad (9)$$

#### 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ンネル状態に応じて同時接続ユーザが変化する。したがって、同時接続ユーザ数が予め決められているシステムにおいては、従来のアルゴリズムにユーザ選択の動作が必要となる。図 5 にユーザ選択の動作を加えた Max map アルゴリズムのフローチャートを示す。図 5 では、まず始めに従来の Max map アルゴリズムを行った後、その時点で最もチャンネル容量  $C_u$  の大きいユーザを選択する。選択されたユーザのサブキャリア数が  $M$  より多い場合は、そのユーザに割り当てられるサブキャリア数が  $M$  となるように、 $h_{u,k}$  が小さいサブキャリアから順に取り除く。取り除かれたサブキャリアはサブキャリア割当てが完了していないユーザの中で  $h_{u,k}$  を最大とするユーザに割り当てられる。一方、サブキャリア数が  $M$  より少ない場合は、選択されたユーザのチャンネル容量  $C_u$  が最大となるように、サブキャリア数が  $M$  になるまで、他のユーザ（サブキャリア割当てが完了していないユーザ）に割り当てられているサブキャリアを選択し、新たに組み入れる。選択されたユーザのサブキャリア数が  $M$  となった時点でそのユーザのサブキャリア割当ては完了する。この操作が終了した後に、サブキャリア割当てが完了していないユーザの中でチャンネル容量が最大のユーザを選び直し同様の操作を行う。サブキャリア割当てが完了しているユーザが  $U_i$  に達するまでこの操作を繰り返す。

#### 4.2. 提案 Max min

Max min アルゴリズムは全ユーザに等しいチャンネル容量を与え、高い公平性を実現できるが、全ユーザ数がチャンネル数よりも多い場合など同時接続ユーザ数は制限される。同時接続ユーザ数を制御可能なスケジューリングアルゴリズムを図 6 に示す。図 6 では、まず始めに従来の Max min アルゴリズムを行った後に、その時点でサブキャリア数  $\text{No}(S_u)$  が最大となるユーザを選択する。サブキャリア数が最大となるユーザが複数存在する場合はサブキャリア数が最大となるユーザの集合  $U_{MAX}$  の中からチャンネル容量  $C_u$  が最小のユーザを選択する。選択されたユーザのサブキャリア数が  $M$  より多い場合は、そのユーザに割り当てられたサブキャリア数が  $M$  となるように  $h_{u,k}$  が小さいサブキャリアから順に取り除く。一方、サブキャリア数が  $M$  より少ない場合は、選択されたユーザのチャンネル容量  $C_u$  が最大となるように、サブキャリア数が  $M$  となるまで、他のユーザ（サブキャリア割当てが完了していないユーザ）に割り当てられているサブキャリアを選択し、新たに組み入れる。選択されたユーザのサブキャリア数が  $M$  となった時点でそのユーザのサブキャリア割当ては完了し、サブキャリア割当てが完了していないユーザに割り当てられたサブキャリアをユーザから取り除く。この操作が終了した後にサブキャリア割当てが完了していないユーザに対して再度従来の Max min アルゴリズムを行い、ユーザを選択し直し、同様の操作を行う。サブキャリア割当てが完了しているユーザが  $U_i$  に達するまでこの操作を繰り返す。

#### 4.3. 提案 PF map

提案 PF map アルゴリズムは提案 Max map と同様の

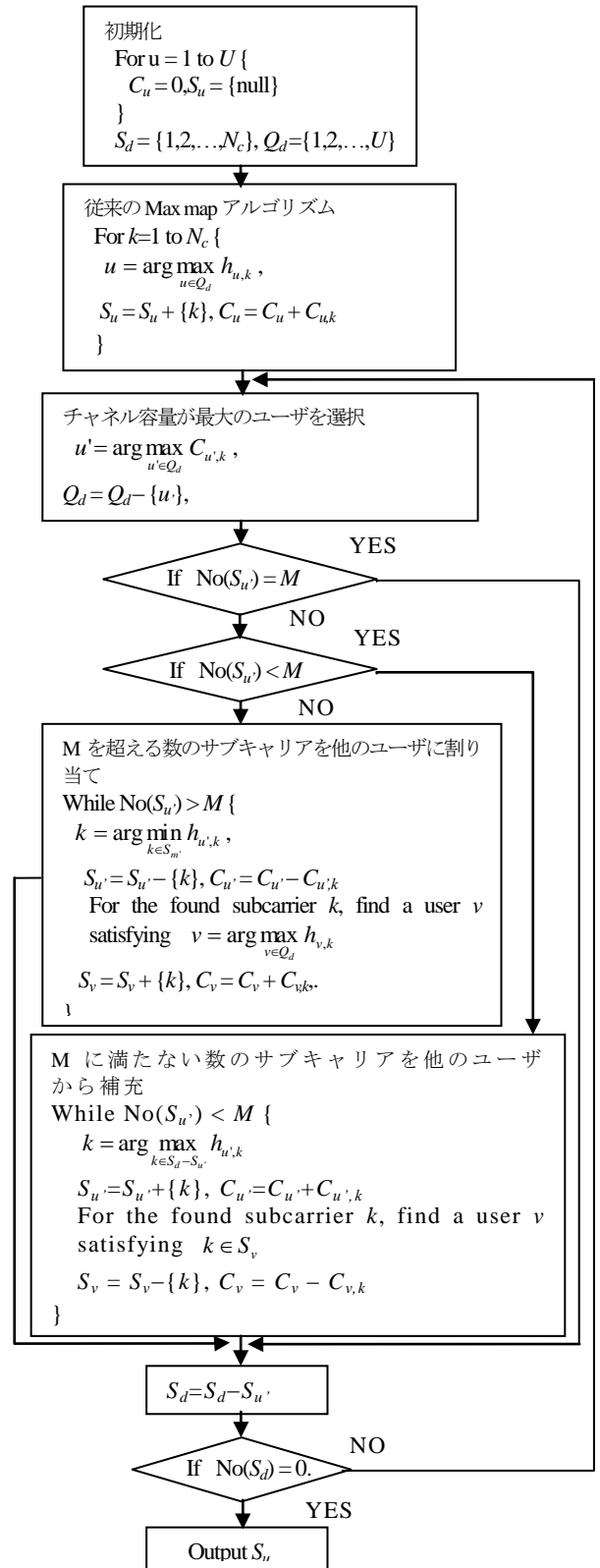


図 5 提案 Max map

操作を行う。ただし、提案 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  $h_{u,k}$  の代わりに式(7)の正規化チャンネル容量  $C'_{u,k}$  を用いてスケジューリングを行う。

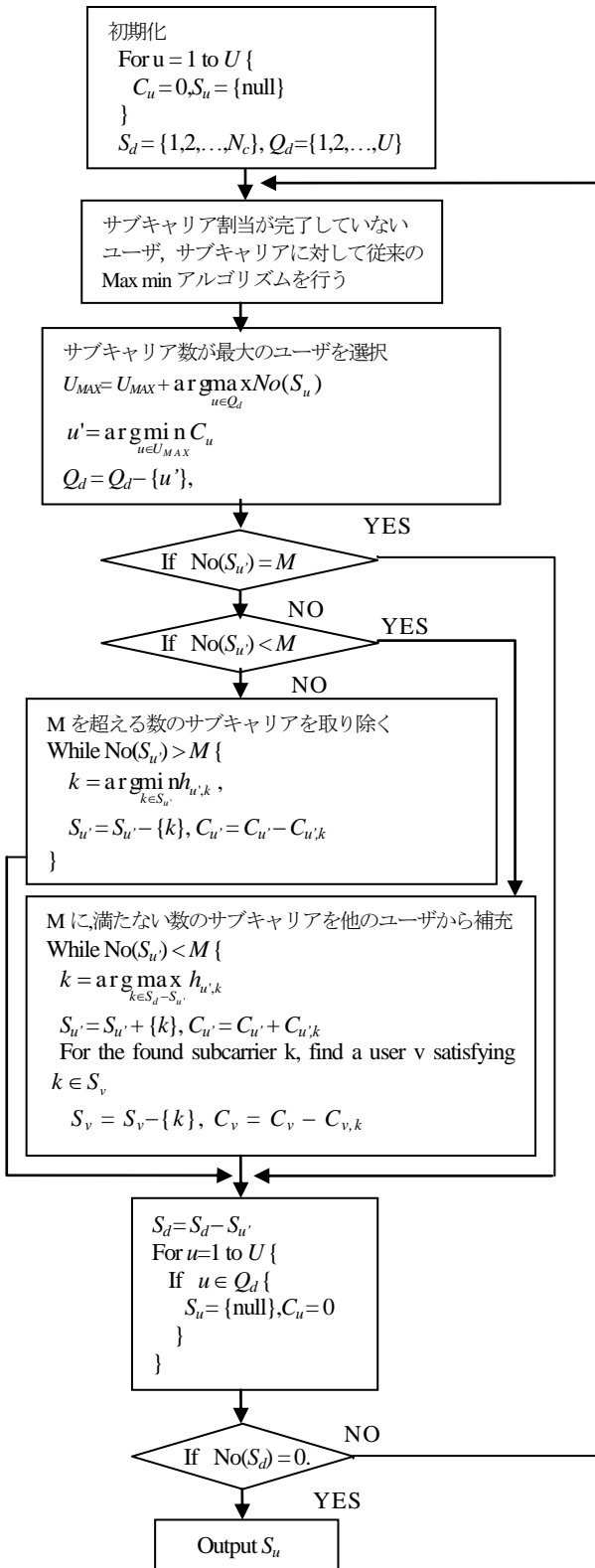


図 6 提案 Max min

## 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[9]の累積分布関数を求めた。ここで Fairness index  $F$  を次式のように定義する。

$$F = \frac{\left( \sum_{u=0}^{U-1} \bar{C}_u \right)^2}{U \cdot \sum_{u=0}^{U-1} \bar{C}_u^2} \quad (10)$$

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。シミュレーションモデルについて示す。K=6個のリレー局が基地局から等しい距離に等間隔に配置されているとし、正規化RS-BS間距離  $r_{M \rightarrow R}$  を  $r_{M \rightarrow R}=0.5$  とする。MT-RS間距離が最小となるRSを1局選択するものとしている。また、送信電力  $P_T$  はMTおよびRSに等しく配分されるものとする ( $\bar{P}_{T,M} = \bar{P}_{T,R} = \bar{P}_T/2$ )。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  $\alpha$  およびシャドウイング標準偏差  $\eta$  をそれぞれ  $\alpha=3.5$ ,  $\eta=8.0(\text{dB})$  と仮定する。但し、RS-BS間のシャドウイングの標準偏差は  $0(\text{dB})$  とする。また、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	$U_i=1,2,4,8,16,32,64,128$
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7に提案 Max map, Max min, PF mapにおける10%アウテージ Fairness index 対10%アウテージユーザチャンネル容量特性において、同時接続ユーザ数を変化させた場合の結果を示す。図7より、各スケジューリング法において、同時接続ユーザ数を増やすほど公平性が高くなり、ユーザチャンネル容量が小さくなることが分かる。この理由は以下のように考えられる。同時接続ユーザ数が多くなるにつれ、全ユーザの通信機会を等しくすることができる。そのため公平性が高くなる。しかしながら、各々のユーザに割り当てられる帯域幅が狭くなるためユーザチャンネル容量が小さくなる。また、今回の条件においては、ユーザチャンネル容量を最大にするには提案 Max map スケジューリングにおいて同時接続ユーザ数を1として行えば良いことが分かる。一方、公平性を最大にするには同時接続ユーザ数を最大 ( $U_i=N_c$ ) にすれば良いことが分かる。また、提案 PF map スケジューリングにおいて同時接続ユーザ数が1の場合、10%アウテージユーザチャンネル容量が2.53(bps/Hz/user)、10%アウテージ Fairness index が0.328を達成しており、公平性の劣化を防ぎつつ、高いユーザチャンネル容量を実現している。

図8に提案 Max map, Max min, 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8より、10%アウテージ合計

チャンネル容量が最大となる同時接続ユーザ数は Max map では 32 (全ユーザ数の 1/4), PF map では 16 (全ユーザ数の 1/8), Max min では 128 (全ユーザ数と等しい値) となることから分かる。合計チャンネル容量が最大となる同時接続ユーザ数がスケジューリングによって異なる理由は次のことが考えられる。Max map や PF map においては、同時接続ユーザ数が少ない場合、その数が大きくなるにつれ、適応サブキャリア割当による高い周波数ダイバーシチ効果が得られるが、同時接続ユーザ数が多い場合、その数が大きくなるほどチャンネル状態の悪いユーザも選択されるため合計チャンネル容量が小さくなる。つまり、適応的なユーザ選択の効果が小さいと言える。Max map においては  $U_i=32$  のとき、PF map においては  $U_i=16$  のときに適応サブキャリア割当の効果と適応的なユーザ選択の効果のトレードオフを実現するため、合計チャンネル容量が最大となったと考えられる。Max min においてはチャンネル状態の悪いユーザを優先してスケジューリングするため、同時接続ユーザ数が多くなるほどチャンネル状態の良いユーザの通信機会が得られ、合計チャンネル容量が向上したと考えられる。

## 6. むすび

本稿では、上りリンク SC-FDMA 協調 AF リレー通信を対象に、同時接続ユーザ数を制御できるスケジューリング法を提案した。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同時接続ユーザ数の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、同時接続ユーザ数が少ない場合、ユーザあたりのチャンネル容量および合計チャンネル容量が最も高い特性を示したのは変形 Max map であり、公平性が最も高い特性を示したのは変形 Max min であることを示した。また、変形 PF map はチャンネル容量および公平性の劣化を防ぐことを示した。さらに、変形 Max map スケジューリング法では、同時接続ユーザ数が全ユーザ数の 1/4 程度のとき合計チャンネル容量が最大なることを示した。また、3 つの変形スケジューリング法とも同時接続ユーザ数を増やすほど、公平性が高くなることを示した。

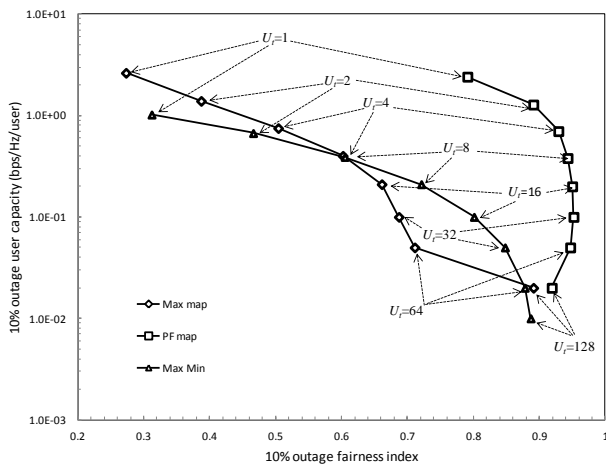


図 7 10%アウテージユーザチャンネル容量対 Fairness index

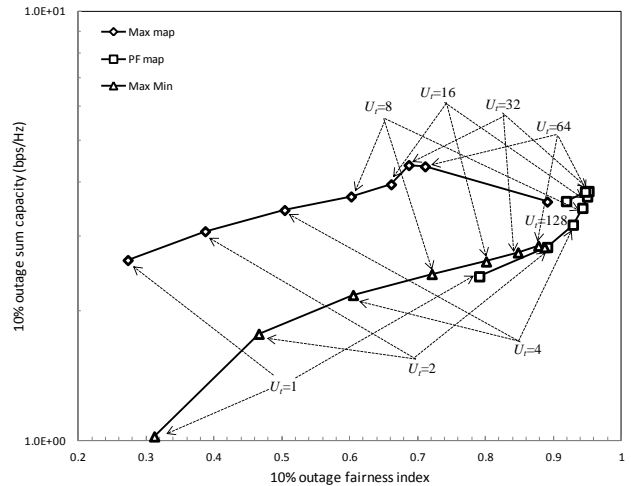


図 8 10%アウテージ合計チャンネル容量対 Fairness index

## 文 献

- [1] J.N.Laneman, D.N.C.Tse, and G. W. Wornell, "Cooperative diversity in wireless networks: efficient protocols and outage behavior," IEEE Trans. Inf. Theory, Vol. 50, No. 12, pp. 3062-3080, Dec. 2004.
- [2] R. Prasad, OFDM for wireless communications systems, Artech House, 2004.
- [3] Hyung G. Myung, "Introduction To Single Carrier Fdma", 2007 EURASIP, EUSIPCO, Poznan 2007.
- [4] 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.
- [5] 松田大輝, 武田一樹, 安達文幸, "送信ダイバーシチを用いる SC-FDMA 分散アンテナネットワークのチャンネル容量," 信学技報, RCS2009-303, pp.263-268, 2010年3月
- [6] Wonjong Rhee, John M. Cioffi "Increase in Capacity of Multiuser OFDM System Using Dynamic Subchannel Allocation" VTC 2000.
- [7] 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
- [8] Rabie Almatarneh, Mohamed Ahmed, Octavia Dobre "Frequency-Time Scheduling Algorithm for OFDMA Systems," in Electrical and Computer Engineering, 2009. CCECE '09.
- [9] 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.