

# 適応サブキャリア割り当てと送信電力制御を用いる下りリンク MC-CDMA のリンク容量

三井 久士<sup>†</sup> 武田 和晃<sup>†</sup> 安達 文幸<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> {mitsui, takeda}@mobile.ecei.tohoku.ac.jp, <sup>‡</sup> adachi@ecei.tohoku.ac.jp

あらまし 超高速なデータ伝送が望まれる次世代セルラー移動無線通信の有力な無線アクセス方式として、マルチキャリア符号分割多元接続(MC-CDMA)が注目されている。伝搬状態の良いサブキャリアを各ユーザに割り当てることでリンク容量を向上できるが、他セルからの干渉によりセル端付近のユーザの伝送特性が劣化してしまう。送信電力制御(TPC)を用いれば、セル端付近のユーザの伝送特性を改善できるので、リンク容量の改善が可能である。本論文では、各サブキャリアの信号対干渉雑音電力比(SINR)に基づく適応サブキャリア割り当てと TPC を用いる MC-CDMA 下りリンクについて述べ、計算機シミュレーションにより下りリンク容量を明らかにしている。

キーワード MC-CDMA, 適応サブキャリア割り当て, 送信電力制御

## Link capacity of MC-CDMA downlink with adaptive subcarrier allocation and transmit power control

Hisashi MITSUI<sup>†</sup> Kazuaki TAKEDA<sup>†</sup> and Fumiyuki ADACHI<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> {mitsui, takeda}@mobile.ecei.tohoku.ac.jp, <sup>‡</sup> adachi@ecei.tohoku.ac.jp

**Abstract** Multi-carrier code division multiple access (MC-CDMA) is a promising wireless access technique for next generation cellular communication systems that require high speed data transmission techniques. The link capacity can be improved by adaptively allocating the subcarriers with a good channel condition to each user. However, the transmission performance of a user close to the cell edge deteriorates due to the other-cell interference. The transmission performance can be improved by using the transmit power control (TPC). In this paper, the MC-CDMA downlink with adaptive subcarrier allocation based on the signal-to-interference plus noise ratio (SINR) and TPC is presented. Its downlink capacity is evaluated by computer simulation.

**Keyword** MC-CDMA, adaptive subcarrier allocation, transmit power control

### 1. まえがき

次世代の移動通信では、より高速でより高品質なデータ伝送が要求されている。しかし、移動無線チャネルは、多数の遅延時間の異なる伝搬路により構成される。このような周波数選択性フェージングチャネルにおいては、符号間干渉により伝送特性の劣化を招いてしまう。そこで近年、周波数選択性フェージングに強い耐性を持つマルチキャリア符号分割多元接続(MC-CDMA)が有力な無線アクセス方式として注目を集めている[1][2]。MC-CDMAでは、データシンボルを、複数の直交するサブキャリアに渡って拡散することで周波数ダイバーシチ効果が得られ、優れた伝送特性が得られることが知られている。

無線リソースを複数のユーザで共有する無線通信システムにおいて、状態の良いユーザに無線リソースを割り当てることで、システムの伝送特性を改善できる。無線リソース割り当て技術の一つとして、スケジューリングがよく知られている[3][4]。スケジューリングでは、伝搬状態の良いユーザに優先的に送信機会を割り当てることで、トータルスループットを増大させることができる。しかし、常に伝搬状態の悪いユーザ

には、送信機会が割り当てられないという公平性の問題があり、トータルスループットの向上と公平性の確保をどうバランスさせるかが重要である。一方、全ユーザに等しくリソースを割り当てることで、同時通信が可能である。このとき、各ユーザに伝搬状態の良いサブキャリアを割り当てることで、同時通信可能なユーザ数(リンク容量)を増大させることができる[5]。

一方、CDMAを用いるセルラーシステムでは、送信電力制御(TPC)によって、全ユーザの受信電力を一定にすることで、セル端付近のユーザの誤り率特性を改善でき、リンク容量の更なる向上が期待できる。よく知られている送信電力制御には、平均受信電力を一定にする低速 TPC と、瞬時受信電力を一定にする高速 TPC がある[6]。適応サブキャリア割り当てと送信電力制御の組み合わせの議論は、これまでは主にシングルセル環境において行われてきた[7][8]。

本論文では、マルチセル環境において、各サブキャリアの信号対干渉雑音電力比(SINR)に基づく適応サブキャリア割り当てと TPC を用いる MC-CDMA 下りリンク容量について検討している。

本論文の構成は以下のような構成になっている。第2章では、本論文で考慮した適応サブキャリア割り当

て方法について述べている。第3章では、適応サブキャリア割り当てを用いるMC-CDMA下りリンクの送受信系について述べている。第4章では、計算機シミュレーション結果について考察している。

## 2. サブキャリア割り当て法

本論文では、全ユーザのチャネル情報が既知であるものと仮定する。全ユーザのサブキャリア毎の受信SINRを用いてサブキャリア割り当てを行う。各ユーザに $J$ サブキャリアを割り当ててるものとする。ただし、1つのサブキャリアには、1ユーザのみ割り当ててるものとする。本論文では、拡散率 $SF$ でコード多重数 $C$ の直交マルチコードMC-CDMAを仮定している。ただし、 $C/SF \leq 1$ である。 $C/SF=1$ のときはフルコード多重となり、OFDMAと同等の伝送レートが得られる。ユーザ毎に拡散、コード多重を行った後、サブキャリア割り当てを行う。以下では、中心セルの周りに6個の干渉セルがあるものとする。

一般性を失うことなく、第0セルのユーザ $u(0)$ を希望ユーザとする。第 $k$ サブキャリアの受信SINR $\gamma_{u(0)}(k)$ は、次式で与えられる。

$$\gamma_{u(0)}(k) = \frac{\Gamma_{0-u(0)}(k) \cdot |H_{0-u(0)}(k)|^2}{\sum_{m=1}^6 \Gamma_{m-u(0)}(k) \cdot |H_{m-u(0)}(k)|^2 + \frac{SF}{C}} \quad (1)$$

ここで、 $H_{m-u(0)}(k)$ は第 $m$ セルの基地局とユーザ $u(0)$ の間のチャネルの伝達関数である。また、 $\Gamma_{m-u(0)}(k)$ は、第 $k$ サブキャリアにおける、第 $m$ セルの基地局からの平均干渉電力対雑音電力比であり、次式で表される。

$$\Gamma_{m-u(0)}(k) = \frac{P_{m-u(m)}(k) \cdot T_c}{N_0} \cdot r_{m-u(0)}^{-\alpha} \cdot 10^{-\frac{\delta}{10}} \quad (2)$$

ここで、 $P_{m-u(m)}(k)$ は第 $m$ セルの基地局のユーザ $u(m)$ への送信電力、 $r_{m-u(0)}$ は第 $m$ セルの基地局とユーザ $u(0)$ の間の距離、 $\alpha$ は減衰指数、 $\delta$ はシャドウイング損失(dB)である。 $T_c$ は高速フーリエ変換(FFT)のサンプル時間間隔であり、 $N_0$ は相加性ガウス雑音の片側電力スペクトル密度である。

本論文では、以下に示す3種類の割り当て法を用いている。

### (1)Type-1

Type-1では、各ユーザに順番に割り当て機会を与える。まず、 $N_c$ サブキャリアの中から、ユーザ0の受信SINR $\gamma_0(k)$ が最大のサブキャリアをユーザ0に割り当てる。ユーザ0に割り当てたサブキャリアを割り当て候補から除外した後、 $(N_c-1)$ サブキャリアの中から、ユーザ1の受信SINR $\gamma_1(k)$ が最大のサブキャリアをユーザ1に割り当てる。以上の操作をユーザ $(U-1)$ まで行った後、割り当て機会をユーザ0に戻す。これを $J$ 回繰り返す、各ユーザに $J$ サブキャリアを割り当てる。ただし、既にサブキャリアが割り当てられている場合は、次に大きい受信SINRを持つサブキャリアを割り当てる。

図1に、Type-1による割り当て例を示す。 $N_c=4, U=2, J=2$ とした。ユーザ毎に受信SINR $\{\gamma_0(k)\}$ と $\{\gamma_1(k)\}$ をソートすると、ユーザ0は $\{\gamma_0(0) > \gamma_0(1) > \gamma_0(2) > \gamma_0(3)\}$ 、ユーザ1は $\{\gamma_1(2) > \gamma_1(1) > \gamma_1(3) > \gamma_1(0)\}$ となる。まずユーザ0に割り当て機会を与え、 $\gamma_0(0)$ が最も大きいのでサブキャリア0をユーザ0に割り当てる(矢印1)。次にユーザ1に割り当て機会を与え、 $\gamma_1(2)$ が最も大きいのでサブキャリア0をユーザ1に割り当てる(矢印2)。割り当て機会をユーザ0に戻し、 $\gamma_0(1)$ が2番目に大きい

でサブキャリア1をユーザ0に割り当ててる(矢印3)。ここで、 $\gamma_1(1)$ がユーザ1の中で2番目に大きいのが、対応するサブキャリア1が既にユーザ0に割り当てられているために、ユーザ1に割り当てることができない(矢印4)。そこで、3番目に大きいサブキャリア3をユーザ1に割り当ててる(矢印5)。

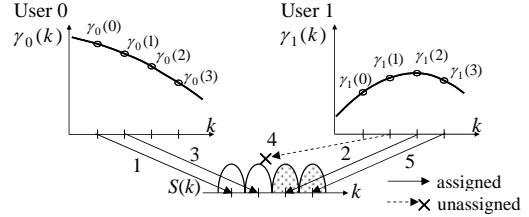


図1 Type-1 割り当て例( $N_c=4, U=2, J=2$ )

### (2)Type-2

Type-2ではまず、割り当てられていないサブキャリアおよび割り当ての完了していないユーザの全てのSINRをソートする。受信SINRの大きいユーザおよびサブキャリアから順次割り当てを行う。ただし、既にサブキャリアが割り当てられている場合は、次に大きい受信SINRを持つサブキャリアを、対応するユーザに割り当てる。

図2に、Type-2による割り当て例を示す。まず、2ユーザの受信SINR $\{\gamma_0(k)\}$ と $\{\gamma_1(k)\}$ をソートすると、 $\{\gamma_0(0) > \gamma_0(1) > \gamma_0(2) > \gamma_1(2) > \gamma_1(1) > \gamma_1(3) > \gamma_0(3) > \gamma_1(0)\}$ となる。 $\gamma_0(0)$ が最も大きいので、サブキャリア0をユーザ0に割り当てる(矢印1)。次に、 $\gamma_0(1)$ が2番目に大きいので、第1サブキャリアをユーザ0に割り当てる(矢印2)。ここで、ユーザ0に $J=2$ 個のサブキャリアが割り当てられたので、ユーザ0を割り当て候補から除外する。残りのユーザの受信SINR $\{\gamma_1(k)\}$ をソートした結果は $\{\gamma_1(2) > \gamma_1(1) > \gamma_1(3) > \gamma_1(0)\}$ となる。 $\gamma_1(2)$ が最も大きいので、サブキャリア2をユーザ1に割り当てる(矢印3)。ここで、 $\gamma_1(1)$ が $\gamma_1(2)$ の次に大きいのが、サブキャリア1は既にユーザ0に割り当てられているために、ユーザ1に割り当てることができない(矢印4)。最後に、空いているサブキャリア3をユーザ1に割り当てる(矢印5)。Type-2では、セル端のユーザなど、全体的に受信SINRが小さいユーザの割り当て機会は後回しとなり、受信SINRの小さいサブキャリアしか割り当てられないことがある。

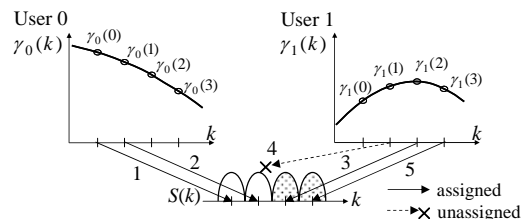


図2 Type-2 割り当て例( $N_c=4, U=2, J=2$ )

### (3)Type-3

Type-3では、まず各ユーザのサブキャリア毎の受信SINRを、ユーザ毎に平均受信SINRで正規化する。次に、Type-2と同様に、全ユーザ、全サブキャリアの正規化受信SINRをソートし、正規化受信SINRが大きいユーザ、サブキャリアから順に割り当てを行う。

図3に、Type-3による割り当て例を示す。まず、各ユーザのサブキャリア毎の受信SINRを、ユーザ毎に平均受信SINRで正規化し、正規化受信SINR $\{\gamma'_0(k)\}$ 、 $\{\gamma'_1(k)\}$ をソートする。ソート結果は $\{\gamma'_1(2) > \gamma'_0(0) > \gamma'_1(1) > \gamma'_1(3) > \gamma'_0(1) > \gamma'_1(0) > \gamma'_0(2) > \gamma'_0(3)\}$

となる． $\gamma'_1(2)$ が最も大きいので，サブキャリア 2 をユーザ 1 に割り当てる(矢印 1)．次に， $\gamma'_0(0)$ が 2 番目に大きいので，サブキャリア 0 をユーザ 0 に割り当てる(矢印 2)．続いて， $\gamma'_1(1)$ が 3 番目に大きいので，サブキャリア 1 をユーザ 1 に割り当てる(矢印 3)．ここで，ユーザ 1 に  $J=2$  個のサブキャリアが割り当てられたので，ユーザ 1 を割り当て候補から除外する．残りのユーザのソート結果は  $\{\gamma'_0(1) > \gamma'_0(2) > \gamma'_0(3)\}$  となる． $\gamma'_0(1)$ が最も大きい，サブキャリア 1 が既にユーザ 1 に割り当てられているために，ユーザ 0 に割り当てることができない(矢印 4)．最後に，空いているサブキャリア 2 をユーザ 0 に割り当てる(矢印 5)．

Type-3 では，Type-2 と異なり，サブキャリア毎の受信 SINR を平均受信 SINR で正規化した正規化受信 SINR  $\{\gamma'_u(k)\}$  を用いているので，平均受信 SINR が小さいユーザでも，受信 SINR の大きいサブキャリアが割り当てられる可能性がある．

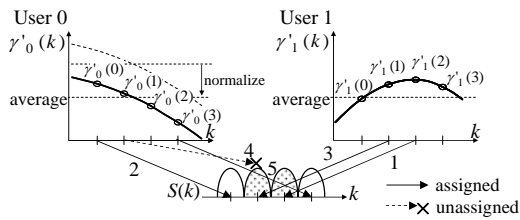


図3 Type-3 割り当て例 ( $N_c=4, U=2, J=2$ )

### 3. MC-CDMA 下りリンク伝送系

#### 3.1. 送信系

適応サブキャリア割り当てを用いる MC-CDMA 下りリンク伝送系を図 4 に示す．本論文では，FFT のサンプル時間間隔  $T_c$  の離散時間表現を用いる．

基地局送信機では， $U$  ユーザに  $J$  サブキャリアを割り当て， $N_c$  サブキャリアを用いてデータを送信する．まず，各ユーザの送信ビット系列に対してデータ変調を行い，直並列変換により  $C$  個の並列データシンボル系列に変換し，それぞれに拡散率  $SF$  の直交拡散符号を乗算する．ここで，第  $m$  セルにおけるユーザ  $u(m)$ ，コード  $c$  のデータシンボル系列を  $\{d_c^{u(m)}(n); n=0 \sim J/SF-1\}$ ，直交拡散符号を  $\{c_c^{u(m)}(i); i=0 \sim SF-1\}$  とする．拡散された  $C$  個のチップ系列はコード多重され，再び直並列変換される．したがって，1 ユーザ当たり  $J/SF \times C$  シンボルを送信する．ユーザ  $u(m)$  の送信チップ系列を，ベクトル表現を用いて  $\mathbf{s}_{u(m)} = [s_{u(m)}(0), \dots, s_{u(m)}(i), \dots, s_{u(m)}(J-1)]^T$  と表す．ここで  $T$  は転置を表す．送信チップ系列の第  $i$  チップ  $s_{u(m)}(i)$  は次式で与えられる．

$$s_{u(m)}(i) = \sqrt{2P_{m\_u(m)}} \sum_{c=0}^{C-1} d_c^{u(m)} \left( \left\lfloor \frac{i}{SF} \right\rfloor \right) c_c^{u(m)}(i \bmod SF) \quad (3)$$

ここで， $\lfloor x \rfloor$  は， $x$  を超えない最大の整数である．また， $P_{m\_u(m)}(i)$  は第  $m$  セルの基地局からユーザ  $u(m)$  に送信する信号のサブキャリアあたりの送信電力である．

各ユーザの送信チップ系列を  $J$  個の送信サブキャリアを用いて送信する．割り当て後の送信サブキャリア成分  $\mathbf{S}^{(m)} = [S^{(m)}(0), \dots, S^{(m)}(k), \dots, S^{(m)}(N_c-1)]^T$  は次式で表される．

$$\mathbf{S}^{(m)} = \sum_{u(m)=0}^{U-1} \mathbf{Q}_{u(m)} \mathbf{s}_{u(m)} \quad (4)$$

ここで， $\mathbf{Q}_{u(m)}$  は  $N_c \times J$  のサブキャリア割り当てを表す行列であり，次式の条件を満たす．

$$[\mathbf{Q}_{u(m)}]^T \mathbf{Q}_{u'(m)} = \begin{cases} \mathbf{I} & (\text{if } u(m) = u'(m)) \\ \mathbf{0} & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (5)$$

ここで， $\mathbf{I}$  は  $J \times J$  の単位行列， $\mathbf{0}$  は  $J \times J$  の零行列である． $\mathbf{Q}_{u(m)}$  の  $p$  行  $q$  列の成分  $[\mathbf{Q}_{u(m)}]_{pq}$  は，第  $p$  サブキャリアがユーザ  $u(m)$  に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．たとえば， $N_c=4, U=2, J=2$  のとき，ユーザ 0 に第 0, 3 サブキャリア，ユーザ 1 に第 1, 2 サブキャリアが割り当てられたときの  $\mathbf{Q}_0$  および  $\mathbf{Q}_1$  は，次式で表される．

$$\mathbf{Q}_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{Q}_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

割り当て後の送信サブキャリア成分に，セル識別のためにスクランブル符号  $\mathbf{C}_{scr}^{(m)} = \text{diag}[c_{scr}^{(m)}(0), \dots, c_{scr}^{(m)}(k), \dots, c_{scr}^{(m)}(N_c-1)]$  を乗算する．スクランブル符号を乗算した後， $N_c$  ポイントの IFFT を適用して MC-CDMA 信号  $\{\tilde{s}^{(m)}(t); t=0 \sim N_c-1\}$  を生成する．

$$\tilde{s}^{(m)}(t) = \sum_{k=0}^{N_c-1} S^{(m)}(k) c_{scr}^{(m)}(k) \exp\left(j2\pi \frac{k}{N_c} t\right) \quad (7)$$

最後に， $N_g$  サンプルのガードインターバル(GI)を挿入し，送信する．

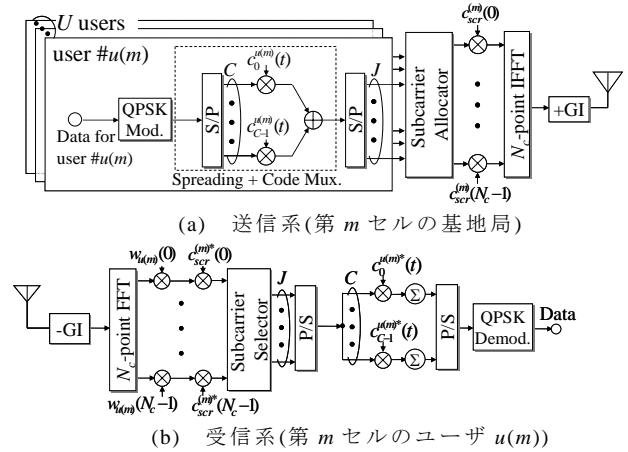


図4 送受信系構成図

#### 3.2. 送信電力制御

本論文では，低速 TPC と高速 TPC を考えている．総送信電力を一定にするために次式のような電力正規化を行う．

$$\sum_{u(m)=0}^{U-1} \sum_{i=0}^{J-1} P_{m\_u(m)}(i) = P \quad (8)$$

低速 TPC を用いる場合は，次式で示すように，平均受信電力が一定になるように，距離減衰およびシャドウイングを補償する．

$$P_{m\_u(m)}(i) = \frac{P}{J} \cdot \frac{\left( r_{m\_u(m)}^{-\alpha} \cdot 10^{-\frac{\delta}{10}} \right)^{-1}}{\sum_{u'(m)=0}^{U-1} \left( r_{m\_u'(m)}^{-\alpha} \cdot 10^{-\frac{\delta}{10}} \right)^{-1}} \quad (9)$$

高速 TPC を用いる場合は，瞬時受信電力が一定になるように，フェージングを補償する．ここで，送信チッ

プ系列の第  $i$  チップが第  $k_i$  サブキャリアに割り当てられたとする。このとき、高速 TPC を用いたときのサブキャリアあたりの送信電力は次式で表される。

$$P_{m\_u(m)}(i) = \frac{P}{J} \cdot \frac{\left( r_{m\_u(m)}^{-\alpha} \cdot 10^{-\frac{\delta}{10}} \sum_{i=0}^{J-1} |H_{m\_u(m)}(k_i)|^2 \right)^{-1}}{\sum_{u'(m)=0}^{U-1} \left( r_{m\_u'(m)}^{-\alpha} \cdot 10^{-\frac{\delta}{10}} \sum_{i=0}^{J-1} |H_{m\_u'(m)}(k_i)|^2 \right)^{-1}} \quad (10)$$

なお、TPC を用いない場合は、次式に示すようにユーザに依らずに一定の電力で送信する。

$$P_{m\_u(m)}(i) = \frac{P}{JU} \quad (11)$$

### 3.3. 受信系

送信信号は、 $L$  個の遅延時間の異なるパスで構成される周波数選択性フェージングチャネルを伝搬して受信される。GI を除去した後の、第 0 セルのユーザ  $u(0)$  の受信信号  $r_{u(0)}(t); t=0 \sim N_c-1$  は次式で表される。

$$r_{u(0)}(t) = \sum_{m=0}^6 \left[ \sqrt{r_{m\_u(0)}^{-\alpha} \cdot 10^{-\frac{\delta}{10}}} \times \sum_{l=0}^{L-1} h_{m\_u(0)}^l(t) \tilde{s}^{(m)}((t-\tau_l) \bmod N_c) \right] + \eta(t) \quad (12)$$

$\tau_l$  は第  $l$  パスの遅延時間、 $h_{m\_u(0)}^l(t)$  は第  $m$  セルの基地局とユーザ  $u(0)$  の間の伝搬路の第  $l$  パスの複素パス利得であり、 $\sum_{l=0}^{L-1} E[h_{m\_u(0)}^l(t)] = 1$  であるものとする。

また、 $\eta(t)$  は平均 0、分散  $2N_0/T_c$  の複素ガウス雑音である。

受信機では、 $N_c$  点の FFT を適用して、 $N_c$  個のサブキャリア成分に分解する。第  $k$  サブキャリア成分は次式で表される。

$$R_{u(0)}(k) = \frac{1}{N_c} \sum_{t=0}^{N_c-1} r_{u(0)}(t) \exp\left(-j2\pi k \frac{t}{N_c}\right) \quad (13)$$

$N_c$  個のサブキャリア成分を  $\mathbf{R}_{u(0)} = [R_{u(0)}(0), \dots, R_{u(0)}(k), \dots, R_{u(0)}(N_c-1)]^T$  を用いてベクトル表示すると、次式で表せる。

$$\mathbf{R}_{u(0)} = \sum_{m=0}^6 \sqrt{r_{m\_u(0)}^{-\alpha} \cdot 10^{-\frac{\delta}{10}}} \mathbf{H}_{m\_u(0)} \mathbf{C}_{scr}^{(m)} \mathbf{S}^{(m)} + \mathbf{\Pi} \quad (14)$$

ここで、 $\mathbf{H}_{m\_u(0)} = \text{diag}[H_{m\_u(0)}(0), \dots, H_{m\_u(0)}(N_c-1)]$  は第  $m$  セルの基地局とユーザ  $u(0)$  の間の伝搬路の伝達関数を対角成分に持つ対角行列、 $\mathbf{\Pi} = [\Pi(0), \dots, \Pi(N_c-1)]^T$  は雑音成分である。 $H_{m\_u(0)}(k)$  と  $\Pi(k)$  はそれぞれ次式で表せる。

$$\begin{cases} H_{m\_u(0)}(k) = \sum_{l=0}^{L-1} h_{m\_u(0)}^l(t) \exp\left(-j2\pi k \frac{\tau_l}{N_c}\right) \\ \Pi(k) = \frac{1}{N_c} \sum_{t=0}^{N_c-1} \eta(t) \exp\left(-j2\pi k \frac{t}{N_c}\right) \end{cases} \quad (15)$$

$R_{u(0)}(k)$  にスクランブル符号の複素共役  $c_{scr}^{(0)*}(k)$  を乗算した後、次式で表される MMSE 周波数領域等化重み  $w_{u(0)}(k)$  を乗算する。

$$w_{u(0)}(k) = \frac{\Gamma_{0\_u(0)}(k) \cdot H_{0\_u(0)}^*(k)}{\sum_{m=0}^6 \Gamma_{m\_u(0)}(k) \cdot |H_{m\_u(0)}(k)|^2 + \frac{SF}{C}} \quad (16)$$

次に、周波数領域等化後のサブキャリア成分から、所望のサブキャリア成分を取り出す。ここで、各ユーザは、送信機においてどのサブキャリアが割り当てられたか正しく分かっていると仮定する。ユーザ  $u(0)$  の  $J$  個のサブキャリア成分のベクトル表示  $\hat{\mathbf{R}}_{u(0)} = [\hat{R}_{u(0)}(0), \dots, \hat{R}_{u(0)}(i), \dots, \hat{R}_{u(0)}(J-1)]^T$  は、割り当て行列  $\mathbf{Q}_{u(0)}$  を用いて次式のように表される。

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{R}}_{u(0)} &= [\mathbf{Q}_{u(0)}]^T \mathbf{w}_{u(0)} \mathbf{C}_{scr}^{(0)*} \mathbf{R}_{u(0)} \\ &= \sum_{m=0}^6 \left[ \sqrt{r_{m\_u(0)}^{-\alpha} \cdot 10^{-\frac{\delta}{10}}} [\mathbf{Q}_{u(0)}]^T \mathbf{w}_{u(0)} \mathbf{H}_{m\_u(0)} \right. \\ &\quad \left. \times \mathbf{C}_{scr}^{(0)*} \mathbf{C}_{scr}^{(m)} \left\{ \sum_{u'(m)=0}^{U-1} \mathbf{Q}_{u'(m)} \mathbf{S}_{u'(m)} \right\} \right. \\ &\quad \left. + [\mathbf{Q}_{u(0)}]^T \mathbf{w}_{u(0)} \mathbf{C}_{scr}^{(0)*} \mathbf{\Pi} \right] \quad (17) \end{aligned}$$

ここで、 $\mathbf{w}_{u(0)} \mathbf{H}_{m\_u(0)} \mathbf{C}_{scr}^{(0)*} \mathbf{C}_{scr}^{(m)}$  は対角行列であることと式(5)より、 $[\mathbf{Q}_{u(0)}]^T \mathbf{w}_{u(0)} \mathbf{H}_{0\_u(0)} \mathbf{C}_{scr}^{(0)*} \mathbf{C}_{scr}^{(0)} \mathbf{Q}_{u'(0)}$  は次式を満たすことが分かる。

$$\begin{aligned} &[\mathbf{Q}_{u(0)}]^T \mathbf{w}_{u(0)} \mathbf{H}_{0\_u(0)} \mathbf{C}_{scr}^{(0)*} \mathbf{C}_{scr}^{(0)} \mathbf{Q}_{u'(0)} \\ &= \begin{cases} [\mathbf{Q}_{u(0)}]^T \mathbf{w}_{u(0)} \mathbf{H}_{0\_u(0)} \mathbf{Q}_{u(0)} & (\text{if } u(0) = u'(0)) \\ \mathbf{0} & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (18) \end{aligned}$$

これより、式(17)は、次式のように表される。

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{R}}_{u(0)} &= \sqrt{r_{0\_u(0)}^{-\alpha} \cdot 10^{-\frac{\delta}{10}}} [\mathbf{Q}_{u(0)}]^T \mathbf{w}_{u(0)} \mathbf{H}_{0\_u(0)} \mathbf{Q}_{u(0)} \mathbf{S}_{u(0)} \\ &\quad + \sum_{m=1}^6 \left[ \sqrt{r_{m\_u(0)}^{-\alpha} \cdot 10^{-\frac{\delta}{10}}} [\mathbf{Q}_{u(0)}]^T \mathbf{w}_{u(0)} \mathbf{H}_{m\_u(0)} \right. \\ &\quad \left. \times \mathbf{C}_{scr}^{(0)*} \mathbf{C}_{scr}^{(m)} \left\{ \sum_{u'(m)=0}^{U-1} \mathbf{Q}_{u'(m)} \mathbf{S}_{u'(m)} \right\} \right. \\ &\quad \left. + [\mathbf{Q}_{u(0)}]^T \mathbf{w}_{u(0)} \mathbf{\Pi} \right] \quad (19) \end{aligned}$$

式(19)において、第 1 項は希望信号成分、第 2 項はセル間干渉成分、第 3 項は雑音成分である。 $J$  個のサブキャリア成分をそれぞれ  $C$  個コピーした後逆拡散し、次式に示す軟判定シンボル系列  $\{\hat{d}_c^{u(0)}(n); n=0 \sim J/SF-1, c=0 \sim C-1\}$  を得る。 $\hat{d}_c^{u(0)}(n)$  は次式で表せる。

$$\hat{d}_c^{u(0)}(n) = \frac{1}{SF} \sum_{i=nSF}^{(n+1)SF-1} \hat{R}_{u(0)}(i) c_c^{u(0)*}(i \bmod SF) \quad (20)$$

## 4. 計算機シミュレーション

### 4.1. シミュレーション条件

本論文では、中央に基地局を持つ正六角形セルを 7 つ配置したマルチセルモデルを用いた。ユーザはセル内に一様に分布しており、ユーザ数  $U$  は各セルで等しいと仮定した。また、BER を測定するユーザは中央の第 0 セルのユーザとした。各ユーザは、隣接する 6 セルの基地局から干渉を受けるものとし、干渉の影響が支配的な干渉リミテッドチャネルを仮定した。

リンク容量を計算機シミュレーションにより求める。シミュレーション条件を表 1 に示す。 $N_c=256$  サブ

キャリアを用い、GIの長さを  $N_g=32$  サンプルとした。適応サブキャリア割り当てにおいて、各ユーザには  $J=16$  個のサブキャリアが割り当てられ、サブキャリア割り当てパターンは 1MC-CDMA シンボルの送信毎に更新するものとした。伝搬路は、減衰指数  $\alpha=4$  の距離減衰と標準偏差  $\sigma=8$  dB の対数正規シャドウイング、および  $L=16$  パスの等電力遅延プロファイルを有するブロックレイリーフェージングチャネルを仮定した。

シミュレーションのフローチャートを図 5 に示す。まず各セルに  $U$  人のユーザを発生させ、各ユーザについて距離減衰、シャドウイングを発生させる。次に  $L$  パスのレイリーフェージングを発生させ、前節に示した割り当て方法を用いて各ユーザに送信サブキャリアを割り当て、送信するものとした。これを十分な回数繰り返し、短区間平均 BER を求める。以上の操作を、各ユーザの発生位置を変えて十分な回数繰り返し、短区間平均 BER が所要 BER を超えてしまう確率、すなわちアウトエージ確率を求める。本論文では、所要 BER を  $10^{-2}$  とした。

表 1 シミュレーション条件

Data modulation		QPSK
MC-CDMA	Number of subcarriers	$N_c=256$
	Guard interval	$N_g=32$
	Spreading sequences	Walsh sequences and PN sequences
	Spreading factor	$SF=1,16$
	Number of codes	$C=SF$
Resource Allocation	Allocatable subcarriers per user	$J=16$
Transmit power control		slow-TPC, fast-TPC
Channel model	Fading	Frequency-selective block Rayleigh fading $\tau_f=1T_c$
	Power delay profile	$L=16$ -path uniform power delay profile
	Path loss exponent	$\alpha=4$
	Standard deviation of shadowing loss	$\sigma=8$ dB
Required BER		$10^{-2}$
Channel estimation		Ideal

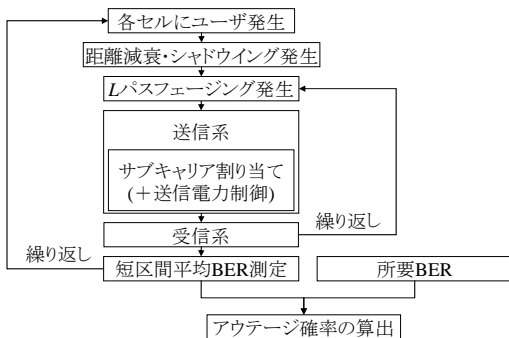


図 5 シミュレーションのフローチャート

## 4.2. シミュレーション結果

図 6 に、基地局からの距離対区間平均 BER 特性を示す。  $SF=C=16$  とした。基地局からの距離毎に 10 の区間に分け、各区間内のユーザの平均 BER を測定した。TPC を用いない場合、基地局から離れるほど特性が劣化し、距離減衰および他セルからの干渉の影響が強いことを示している。一方、TPC を用いると、BER は基地局からの距離にほぼ依存なくなり、特にセル端付近のユーザの BER が改善している。逆に基地局付近の特性が TPC なしと比較して劣化しているのは、TPC に

より希望信号受信電力が小さくなったこと、および他セルでも TPC を行っていることにより、他セルからの干渉信号がユーザ配置によって大きく変動するためである。また、低速 TPC と高速 TPC では、BER はほぼ等しい。これは、周波数選択性が強く、瞬時電力の変動が小さくなるためである。

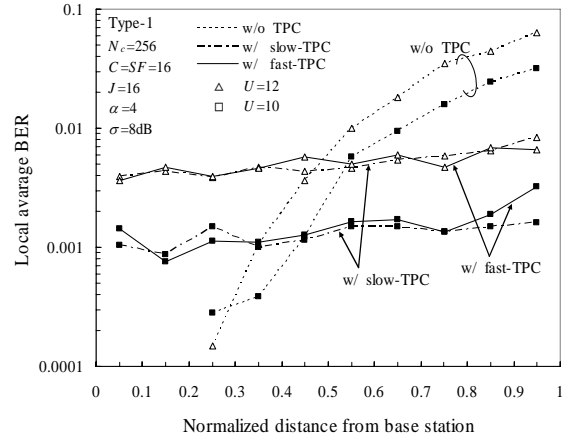


図 6 基地局からの距離対 BER

図 7 に Type-1,2,3 サブキャリア割り当てと低速 TPC を組み合わせたとときのアウトエージ確率を、図 8 に高速 TPC を組み合わせたとときのアウトエージ確率を示す。比較のため、TPC なしの際のアウトエージ確率も示してある。ここで、  $SF=1$  のときは、OFDMA 下りリンクに相当する。どの割り当て法においても、TPC を組み合わせることによりアウトエージ確率が減少している。これは前述したように、TPC によってセル端付近のユーザの特性が改善したためである。許容アウトエージ確率 0.1 を超えない最大のユーザ数をリンク容量  $U_{max}$  と定義する。

Type-2 と Type-3 では、拡散しても特性はほとんど変わらないが、Type-1 では、拡散によってアウトエージ確率が減少する。この理由は、Type-1 では各ユーザに SINR の大きいサブキャリアが割り当てられ、拡散することで周波数ダイバーシチ効果が得られるためである。一方、Type-2 と Type-3 では、ユーザ間で割り当てられたサブキャリアの受信 SINR に偏りがあり、ユーザによっては、受信 SINR の小さいサブキャリアばかり割り当てられることがある。このようなユーザは、拡散しても特性が改善しないために、拡散によるアウトエージ確率の減少が見られなかったと考えられる。低速 TPC を用いたとき、  $SF$  に依らず Type-2 は  $U_{max}=9$ 、Type-3 では  $U_{max}=10$  であるが、Type-1 では  $SF=1$  (OFDMA) のとき  $U_{max}=11$ 、  $SF=16$  のとき  $U_{max}=12$  であり、拡散によってリンク容量の向上が見られた。

割り当て法を比較すると、Type-1、Type-3、Type-2 の順で良い特性を示している。Type-1 では、順番にサブキャリア割り当てを行うことで、各ユーザに受信 SINR が大きいサブキャリアが割り当てられるため、他の割り当て法より優れていると考えられる。一方、Type-2 では、セル端などの干渉の影響の強いユーザには、SINR の小さいサブキャリアが割り当てられ、アウトエージ確率が高くなるためである。  $SF=16$  で低速 TPC を用いたときのリンク容量は、Type-1 では  $U_{max}=12$ 、Type-2 では  $U_{max}=9$ 、Type-3 では  $U_{max}=10$  である。

## 5. おわりに

本論文では、MC-CDMA 下りリンクアクセスを対象に、適応サブキャリア割り当てに低速 TPC および高速

TPCを組み合わせたときのリンク容量を計算機シミュレーションにより明らかにした。また、本論文で検討した割り当て法の中では、各ユーザーに順番に1つずつサブキャリアを割り当てる方法を用いることでリンク容量を大きくできること、TPCを用いることで更にリンク容量を向上できることを示した。また、周波数選択性が強いとき、瞬時電力の変動がほとんどないため、低速TPCと高速TPCではリンク容量は同じである。

### 文献

- [1] S. Hara and R. Prasad, "Overview of Multicarrier CDMA", IEEE Commun., Mag., pp.126-144, Dec.1997.
- [2] S. Hara and R. Prasad, "Design and performance of multicarrier CDMA system in frequency-selective Rayleigh fading channels," IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 48, pp. 1584-1595, Sep. 1999.
- [3] A. Jalali, R. Padovani, and R. Pankaj, "Data throughput of CDMA-HDR a high efficiency-high data rate personal communication wireless system," Proc. IEEE VTC 2000 Spring, May 2000.
- [4] C. Wengert, J. Ohlhorst, and A. Golitschek, "Fairness and Throughput Analysis for Generalized Proportional Fair Frequency Scheduling in OFDMA," Proc. IEEE VTC 2005 Spring, June 2005.
- [5] M. Moretti, and M. Morelli, "A novel dynamic subcarrier assignment scheme for multiuser OFDMA systems," Proc. IEEE VTC 2006 Spring, May 2006.
- [6] F. Adachi, A. Katoh, and D. Garg, "Joint effect of transmit power control and antenna diversity on spectrum efficiency of a cellular system," IEICE Trans. Commun., vol. E85-B, No. 5, pp. 919-928, May 2002.
- [7] C. Y. Wong, R. S. Cheng, K. B. Letaief, and R. D. Murch, "Multiuser OFDM with adaptive subcarrier, bit and power allocation," IEEE J. Select. Areas Commun., vol. 17, pp. 1747-1757, Oct. 1999.
- [8] D. Kivanc, G. Li, and H. Liu, "Computationally efficient bandwidth allocation and power control for OFDMA," IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 2, no. 6, pp. 1150-1158, November 2003.

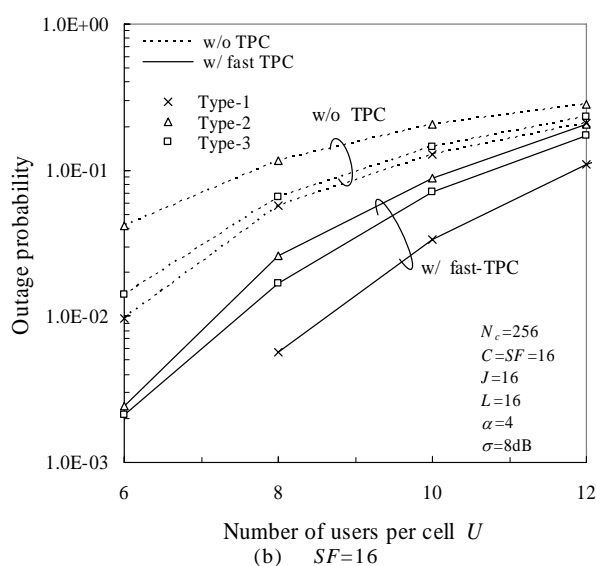
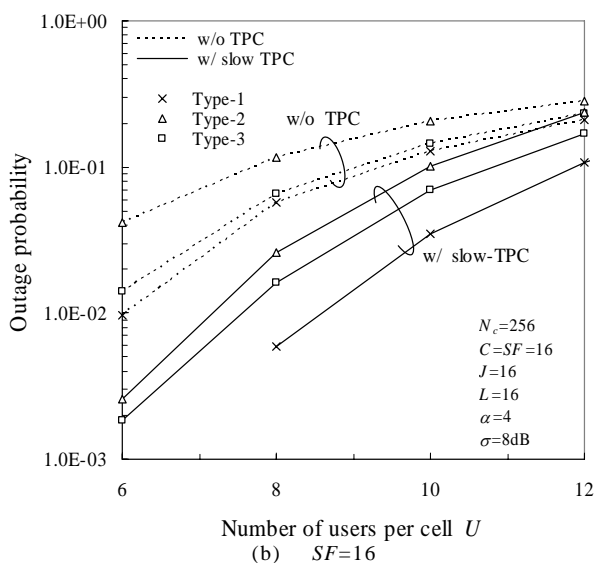
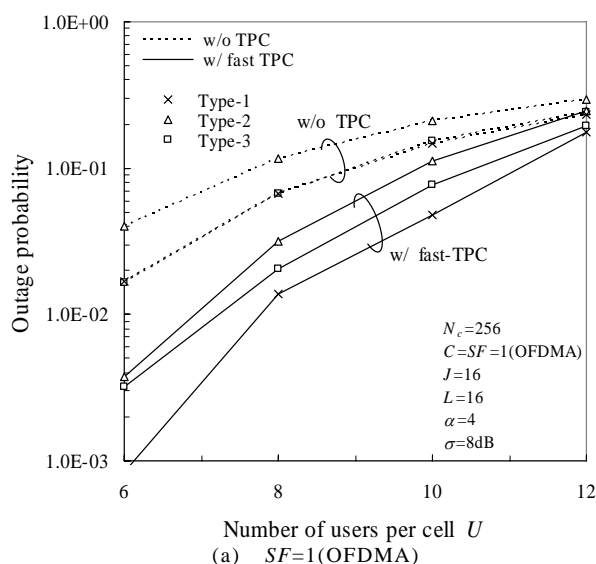
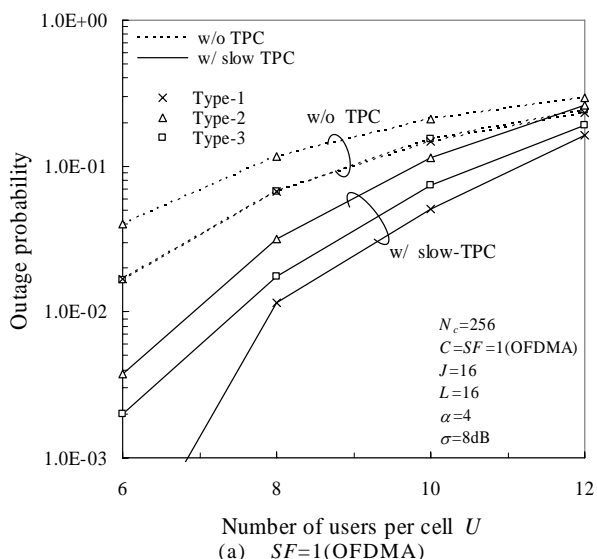


図7 低速TPCを用いたときのアウトージ確率

図8 高速TPCを用いたときのアウトージ確率