

シャドウイング環境下における MC-CDMA サイトダイバーシチの検討

井上 高道[†] 高岡 辰輔[†] 安達 文幸[‡]

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 05

E-mail [†]{inoue, takaoka}@mobile.ecei.tohoku.ac.jp, [‡]adachi@ecei.tohoku.ac.jp

あらまし MC-CDMA を用いる下りリンクセルラ通信では、すべての基地局で同一の周波数を利用できる。そのため、複数の基地局を用いて通信を行う、サイトダイバーシチを用いることにより受信電力が十分に得られないユーザのビット誤り率特性(BER)を向上させ、リンク容量の増加できる。本論文では、サイトダイバーシチに参加する基地局を平均受信電力に基づいて決定するときのシャドウイング環境下におけるリンク容量について検討している。また、サイトダイバーシチ効果に及ぼす伝搬路損失指数およびシャドウイングの標準偏差の影響を計算機シミュレーションにより明らかにしている。

キーワード MC-CDMA, MMSE 周波数領域等化, サイトダイバーシチ

A study on MC-CDMA Site-diversity under shadowing environment

Takamichi INOUE[†] Shinsuke TAKAOKA[†] Fumiyuki ADACHI[‡]

Dept. of Electrical and Communication Engineering, Graduate School of Engineering, Tohoku University

05 Aza-Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai, 980-8579 Japan

E-mail: [†]{inoue, takaoka}@mobile.ecei.tohoku.ac.jp, [‡]adachi@ecei.tohoku.ac.jp

Abstract The site-diversity can be applied to multicarrier-CDMA (MC-CDMA) to improve the bit error rate (BER) performance for a user with weak signal power, resulting in the increased link capacity. In this paper, downlink capacity under shadowing environment is considered when base stations involved in site-diversity operation are determined based on average received power. The impacts of path loss exponent and standard deviation of shadowing loss on the site diversity effect are evaluated by computer simulation.

Keyword: MC-CDMA, MMSE frequency-domain equalization, site-diversity

1. まえがき

セルラ移動無線通信では、マルチパスによる遅延波の影響(すなわち、周波数選択性フェージングの影響)により、伝送特性の劣化を招いてしまう[1]。そのような周波数選択性フェージングに強い耐性を有する MC-CDMA(Multi-Carrier Code Division Multiple Access)が近年、第4世代移動通信方式の有力候補として盛んに研究されている[2],[3]。MC-CDMA では、受信系においてユーザ間の直交性の完全復元をあきらめて雑音強調を抑える MMSE(Minimum Mean Square Error)周波数領域等化を行うことにより、良好な伝送特性を得ることができると良く知られている[4],[5]。

MC-CDMA を用いる下りリンクセルラ通信では、すべての基地局で同一の周波数を利用できる[6]。そのため、複数の基地局から信号送信を行うサイトダイバーシチにより受信電力が十分に得られないユーザのビット誤り率特性(BER)を向上させることができる。筆者らは、これまで、シャドウイングなしのときのリンク容量を検討してきた[7]。本論文では、シャドウイング環境下においてサイトダイバーシチを行う場合のリンク

容量について検討している。本論文で用いたモデルは、平均受信電力が最大となる基地局およびその最大の平均電力から差が閾値 P_{th} 以内である基地局をサイトダイバーシチに参加する基地局として選択する。この閾値の設定により、サイトダイバーシチに参加する基地局数およびユーザ数が決定される。閾値 P_{th} を小さく設定し過ぎると、サイトダイバーシチに参加する基地局が少なくなるから、リンク容量は減少してしまう。逆に、閾値 P_{th} を大きく設定し過ぎると、サイトダイバーシチに参加する基地局の過大な増大を招き、リンク容量は減少してしまう。そのため、閾値 P_{th} はサイトダイバーシチを行う際の重要な設計パラメータとなる。さらに、本論文ではリンク容量に及ぼす伝搬路損失指数およびシャドウイングの標準偏差の影響を計算機シミュレーションにより明らかにしている。

本論文は以下のような構成になっている。第2章では、サイトダイバーシチを用いる MC-CDMA の下りリンクモデルと受信系について述べている。第3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. MC-CDMA におけるサイトダイバーシチ

2.1 サイトダイバーシチモデル

サイトダイバーシチモデルを図 1 に示す。各ユーザは、平均受信電力が最大となる基地局およびその最大の平均電力から差がある値 P_{th} 以内である基地局をサイトダイバーシチに参加する基地局として選択する。ただし、サイトダイバーシチに参加する基地局の最大数を D としている。サイトダイバーシチに参加する基地局は、対象ユーザのデータ系列を拡散して同時送信する。閾値 P_{th} を小さく設定し過ぎると、サイトダイバーシチに参加する基地局が少なくなるから、十分な受信電力を得られないユーザが増えてしまい、リンク容量は減少してしまう。逆に、閾値 P_{th} を大きく設定し過ぎると、サイトダイバーシチに参加する基地局数の増大を招き、リンク容量は減少してしまう。そのため、閾値 P_{th} には最適値が存在するはずである。なお、閾値 $P_{th} = 0$ ときは、サイトダイバーシチなしの場合を表している。

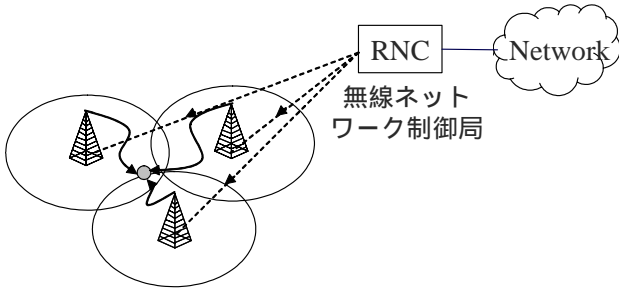


図 1 サイトダイバーシチモデル

2.2 送受信系

セル構成を図 2 に示す。中心のセルが希望ユーザの存在するセルである。サイトダイバーシチに参加する基地局の範囲は、希望セルおよび周辺 6 局の合計 7 セルの候補の中で、平均受信電力が大きい順に選択された D 局であるものとする。しかし、それら周辺 D 局におけるサイトダイバーシチにより増加するチャンネル数も考慮しなければならないので、周辺 D 局がサイトダイバーシチに参加する候補セルである周辺 6 局を含めた合計 19 セルを考慮している。

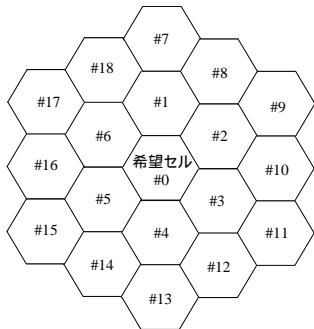


図 2 セル構成

基地局 $\#m$ の下りリンク送信系と移動局の下りリンク受信系を図 3 に示す。サブキャリア数を N_C 、拡散率を SF とする。基地局 $\#m$ と通信しているユーザをユーザ $\#u(m)$ で表す。基地局 $\#m$ の送信機では、ユーザ $\#u(m)$ の N_C/SF 個のデータ変調シンボル $\{x_{u(m)}(i); i=0 \sim N_C/SF-1\}$ を直並列変換する。そして各シンボルを SF 個だけコピーし、各ユーザに割り当てられた直交拡散符号系列 $\{c_{u(m)}(k); k=0 \sim SF-1\}$ を用いて SF 個の

サブキャリアへ拡散する。そして、サブキャリア毎に全ユーザのサブキャリア成分を合成した後、スクランブル符号系列 $\{c_{scr_m}(k); k=0 \sim N_C-1\}$ を乗積する。スクランブル符号系列は送信信号の擬似雑音化およびセル識別のために用いる。サブキャリア $\#k$ の信号成分 $s_m(k)$ は次式のように表すことができる。

$$s_m(k) = \sqrt{\frac{2P_m}{SF}} \sum_{u(m)=0}^{U_m-1} c_{u(m)}(k \bmod SF) c_{scr_m}(k) x_{u(m)} \left(\left\lfloor \frac{k}{SF} \right\rfloor \right) \quad (1)$$

ここで、 P_m は基地局 $\#m$ おける 1 ユーザあたりの平均送信電力、 U_m はアクティブデータチャンネル数である。次に N_C 点の逆高速フーリエ変換 (IFFT) を適用して MC-CDMA 信号 $s_m(t)$ を生成する。これに N_g サンプルのガードインターバル (GI) を付加した後の送信信号 $s_m(t)$ は次式のように表される。

$$s_m(t) = \sum_{k=0}^{N_C-1} s_m(k) \exp \left(j2\pi k \frac{t \bmod N_C}{N_C} \right), \quad t = -N_g \sim N_C-1 \quad (2)$$

なお、本論文では FFT サンプリング間隔 T_C の離散時間表現を用いている。

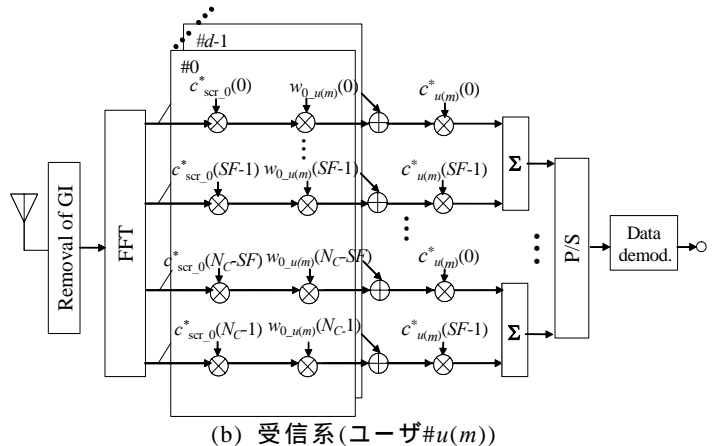
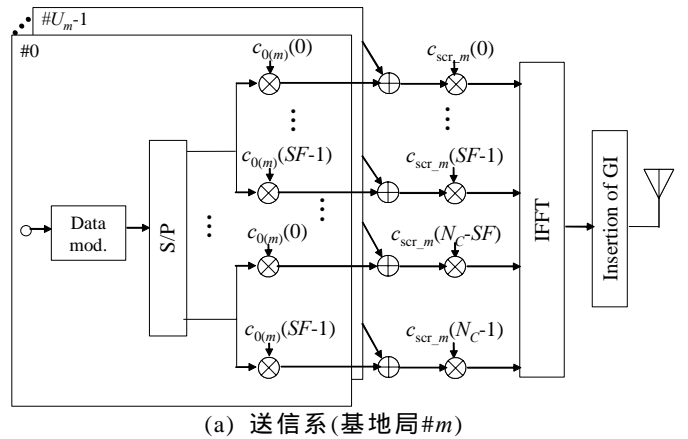


図 3 MC-CDMA 下りリンクの伝送系

L 個の離散パスを持つ周波数選択性フェージングチャンネルを仮定し、基地局 $\#m'$ とユーザ $\#u(m)$ との間の伝搬路のパス $\#l$ の複素パス利得を $\xi_{m'-u(m),l}$ で表すものとする。ユーザ $\#u(m)$ の受信信号 $r_{u(m)}(t)$ は次式のように表せる。

$$r_{u(m)}(t) = \sum_{m'=0}^{\infty} \sum_{l=0}^{L-1} \xi_{m'-u(m),l} S_{m'}((t-l) \bmod N_C) + \eta(t) \quad (3)$$

ここで、少なくとも $t = -N_g \sim N_C - 1$ の区間ではパス利得は一定とみなせるものと仮定している。上式中で $d(\leq D)$ 個の基地局 $\#m'$ がユーザ $\#u(m)$ に対するサイトダイバーシティに参加しているものとする(本論文では、 $m'=0 \sim d-1$ がサイトダイバーシティに参加していて、 $m'=d \sim 6$ は干渉基地局であるものとしている)。パス $\#l$ の遅延時間は lT_C であるものとする。また、 $\eta(t)$ は平均値 0、分散 $2N_0/T_C$ の複素ガウス変数であり、 N_0 は相加性白色ガウス雑音(AWGN)の片側電力スペクトル密度である。

受信機では、GI を除去して得られた受信信号系列 $\{r_{u(m)}(t), t=0 \sim N_C-1\}$ に FFT を適用する。サブキャリア $\#k$ の成分 $R_{u(m)}(k)$ は次式のように表せる。

$$\begin{aligned} R_{u(m)}(k) &= \sum_{t=0}^{N_C-1} r_{u(m)}(t) \exp\left(-j2\pi k \frac{t}{N_C}\right) \\ &= \sum_{m'=0}^{\infty} H_{m'-u(m)}(k) \\ &\quad \times \left[\sqrt{\frac{2S_{m'-u(m)}}{SF}} \sum_{u(m')=0}^{U_{m'}-1} c_{u(m')}(k \bmod SF) c_{scr-m'}(k) x_{u(m')} \left(\left\lfloor \frac{k}{SF} \right\rfloor \right) \right] \\ &\quad + \Pi(k) \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、 $S_{m'-u(m)}$ は、基地局 $\#m'$ の送信信号をユーザ $\#u(m)$ で受信した平均受信電力であり、次式のように与えられる。

$$S_{m'-u(m)} = P_{m'} r_{m'-u(m)}^{-\alpha} 10^{-\beta/10} \quad (5)$$

ここで、 $r_{m'-u(m)}$ は基地局 $\#m'$ と基地局 $\#m$ のユーザ $\#u(m)$ との距離、 α は距離減衰指数、 β はシャドウイング損失 (dB) である。また、 $H_{m'-u(m)}(k)$ は基地局 $\#m$ のユーザ $\#u(m)$ と基地局 $\#m'$ との間の伝搬路の伝達関数であり、次式のように表される。

$$H_{m'-u(m)}(k) = \sum_{l=0}^{L-1} \xi_{m'-u(m),l} \exp\left(-j2\pi k \frac{l}{N_C}\right) \quad (6)$$

また、 $\Pi(k)$ は雑音成分である。

$R_{u(m)}(k)$ に基地局 $\#m'$ のスクランブル符号系列 $\{c_{scr-m'}(k)\}$ の複素共役を乗積し MMSE 周波数領域等化重み $w_{m'-u(m)}(k)$ を乗積する、ここで、MMSE 周波数領域等化重みは次式で与えられる[7]。

$$w_{m'-u(m)}(k) = \frac{\Gamma_{m'-u(m)} H_{m'-u(m)}^*(k)}{\sum_{m'=0}^{\infty} \frac{\Gamma_{m'-u(m)}}{SF} U_{m'} |H_{m'-u(m)}(k)|^2 + 1} \quad (7)$$

ここで、 $\Gamma_{m'-u(m)}$ は1シンボルあたりの有効平均受信信号エネルギー対雑音電力スペクトル比であり次式で表される。

$$\Gamma_{m'-u(m)} = \frac{S_{m'-u(m)} T_S}{N_0} = \Lambda_{m'-u(m)} r_{m'-u(m)}^{-\alpha} 10^{-\beta/10} \quad (8)$$

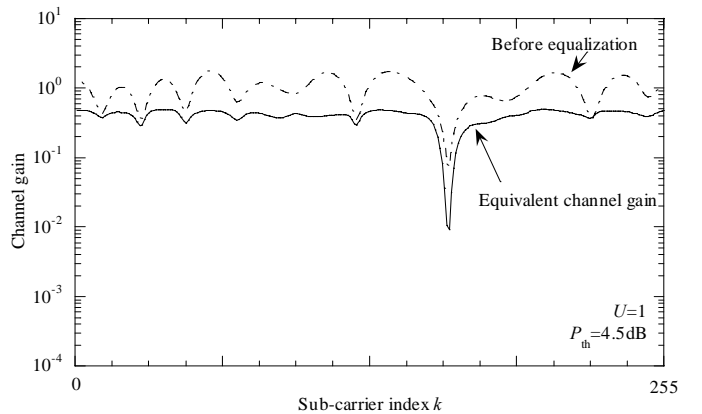
$\Lambda_{m'-u(m)}$ は1シンボルあたりの有効平均送信信号エネルギー対雑音電力スペクトル比である。次に、サイトダイバーシティに参加している d 個の基地局のサブキャリア成分をサブキャリア毎に合成し、 SF サブキャリア分だけ加算する逆拡散を行って、ユーザ $\#u(m)$ の軟判定値 $\hat{x}_{u(m)}(i)$ を得る。サイトダイバーシティに参加している基地局 $\#m'$ は $m'=0 \sim d-1$ であるものとしているので、 $\hat{x}_{u(m)}(i)$ は次式のように表せる。

$$\begin{aligned} \hat{x}_{u(m)}(i) &= \sum_{k=iSF}^{(i+1)SF-1} \left(\sum_{m'=0}^{d-1} R_{u(m)}(k) c_{scr-m'}^*(k) w_{m'-u(m)}(k) \right) \\ &\quad \times c_{u(m)}^*(k \bmod SF) \end{aligned} \quad (9)$$

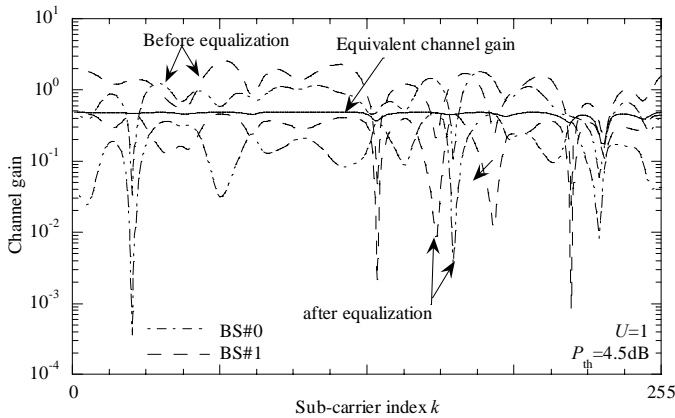
次に、 $\hat{x}_{u(m)}(i)$ を用いて送信データシンボル $x_{u(m)}(i)$ を判定する。

2.3 MMSE 周波数領域等化重み

MMSE 周波数領域等化によって得られる等価チャネル伝達関数を図 4 に示す。図 4(a) では、基地局 $\#0$ からの平均受信電力が他の基地局からの平均受信電力と比べて十分に大きい場合(ここで、基地局 $\#0$ からの最大の平均受信電力と基地局 $\#m$ からの平均受信電力の比を Δ_m とすると、 $(\Delta_0, \Delta_1, \Delta_2, \Delta_3, \Delta_4, \Delta_5, \Delta_6) = (0, -11, -13, -14, -16, -26, -28)$ (dB) の場合)のチャネルの状態を示している。ここでは、サイトダイバーシティに参加する基地局は基地局 $\#0$ の1局のみである。図 4(a) より、すべてのサブキャリアでほぼフラットな周波数非選択性フェージングに近い等価チャネルが得られることが分かる。図 4(b) では、基地局 $\#0, \#1$ からの平均受信電力が他の基地局と比べて十分に大きく、基地局 $\#0, \#1$ からの平均受信電力はほぼ同じ場合 $(\Delta_0, \Delta_1, \Delta_2, \Delta_3, \Delta_4, \Delta_5, \Delta_6) = (0, -1, -10, -11, -16, -18, -23)$ (dB) の場合)の等価チャネル伝達関数を示している。ここでは、サイトダイバーシティに参加する基地局は基地局 $\#0, \#1$ の2局である。図 4(b) より、基地局 $\#0, \#1$ の伝達関数はそれぞれ大きな変動がみられる。しかし、基地局 $\#0, \#1$ の伝達関数の和を見ると、伝達関数の変動は抑えられていることが分かる。つまり、式(7)で与えられるサイトダイバーシティを用いるときの MMSE 周波数領域等化重みは、等価チャネル伝達関数の変動を抑えるような重みとなっている。



(a) 基地局 $\#0$ の平均受信電力が十分に大きい場合 $(\Delta_0, \Delta_1, \Delta_2, \Delta_3, \Delta_4, \Delta_5, \Delta_6) = (0, -11, -13, -14, -16, -26, -28)$ (dB)



(b) 基地局#0,#1の平均受信電力が十分に大きい場合
 $(\Delta_0, \Delta_1, \Delta_2, \Delta_3, \Delta_4, \Delta_5, \Delta_6) = (0, -1, -10, -11, -16, -18, -23)$ (dB)
 図4 MMSE周波数領域等化後の等価チャネル伝達関数

表1 シミュレーション条件

MC-CDMA	Data Modulation		QPSK
	No. of sub-carriers		$N_C=256$
	Guard interval		$32T_C$
	Spreading code	Channelization	OVSF code
		Scrambling	PN code
	Spreading factor		$SF=256$
Frequency-domain equalization		MMSE	
Channel estimation		Ideal	
Site-diversity	User distribution		Uniform
	Allowable outage probability		0.1
	Required BER		10^{-2}
	Maximum no. of site-diversity BSs		$D=1\sim 7$
Threshold		$P_{th}=0\sim 10$ dB	
Channel model	Multipath fading		16-path Rayleigh fading
	Path loss exponent		$\alpha=3\sim 4$
	Standard deviation of shadowing loss		$\sigma=4\sim 10$ dB

3. 計算機シミュレーション

3.1 シミュレーション条件

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る。GIの長さを $N_g=32$ サンプルとした。伝搬路は $L=16$ 個のパスの等電力レイリーフェージングチャネルで、パス# l の遅延時間は l サンプルであるものとした。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テッドチャネルであると仮定した。

モンテカルロシミュレーションでは、まず1セル当たり U 個のユーザを発生させる。各ユーザは、最大の平均受信電力の基地局および最大の平均受信電力から P_{th} 以内の基地局を d 個選択する。ただし、サイトダイバーシティに参加する基地局の最大数を D としている。次に、 $L=16$ 個のパスのレイリーフェージングを発生させ、MMSE周波数領域等化を用いるMC-CDMA下りリンクサイトダイバーシティ受信を行う。これを何度も繰り返すことで平均ビット誤り率(BER)を求める。ユーザの発生位置を変えて上述の平均BERを測定し平均BERの分布を求め、所要BERよりも大きくなる確率、すなわちアウトージ確率を計算する。1セルあたりのユーザ数 U が多くなるにつれてアウトージ確率が大きくなる。許容アウトージ確率を超えない最大ユーザ数をリンク容量と定義する。本論文では、所要BERを 10^{-2} 、許容アウトージ確率を0.1とした。

3.2 シミュレーション結果

リンク容量に及ぼすサイトダイバーシティ閾値 P_{th} の影響を図5、サイトダイバーシティを行うユーザの比率に及ぼす閾値 P_{th} の影響を図6に示す。図5より伝搬路減衰指数 α が大きくなるにつれて、閾値 P_{th} の最適値が大きい方にシフトしていることが分かる。これは、伝搬路減衰指数 α が大きくなるにつれて、各基地局からの受信電力が小さくなることにより、サイトダイバーシティに参加するユーザ比率および基地局数が小さくなる。そのため、サイトダイバーシティにより増加する干渉の影響が小さくなったからである。また、図6より伝搬路減衰指数 α によらず、最適閾値でのサイトダイバーシティを行うユーザの比率はおよそ30%であることが分かる。リンク容量に及ぼす伝搬路減衰指数 α の影響を図7に示す。伝搬路減衰指数 α が大きくなるにつれて、干渉の影響が小さくなるために、リンク容量は増加していることが分かる。

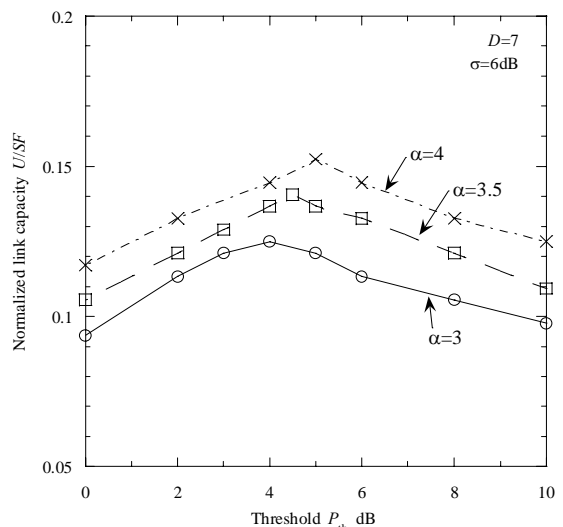


図5 リンク容量に及ぼす閾値 P_{th} の影響

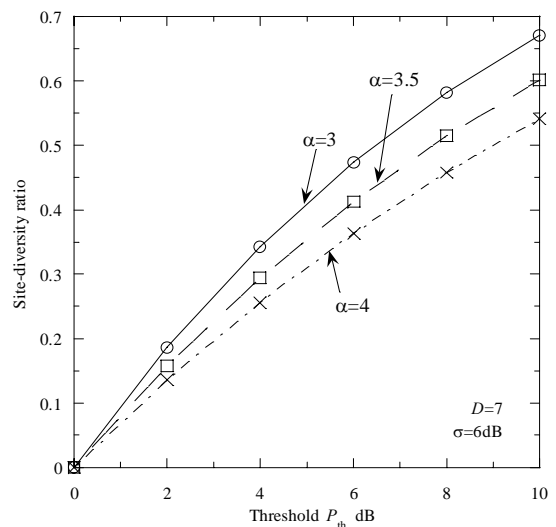


図6 サイトダイバーシティユーザ比率に及ぼす閾値 P_{th} の影響

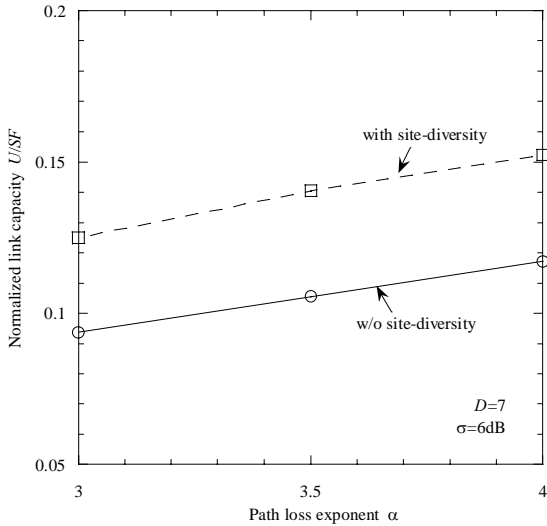


図 7 リンク容量に及ぼす伝搬路減衰指数 α の影響

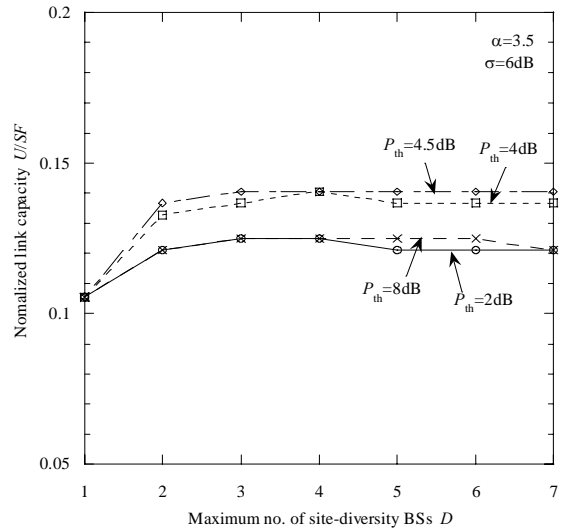


図 9 リンク容量に及ぼすサイトダイバーシティに参加する基地局の最大数 D の影響

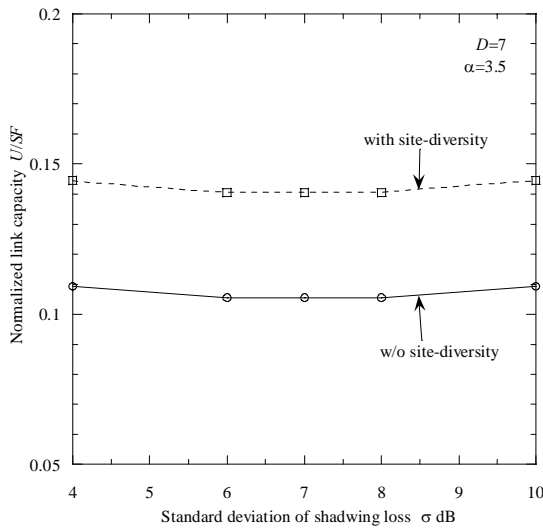


図 8 リンク容量に及ぼすシャドウイングの標準偏差 σ の影響

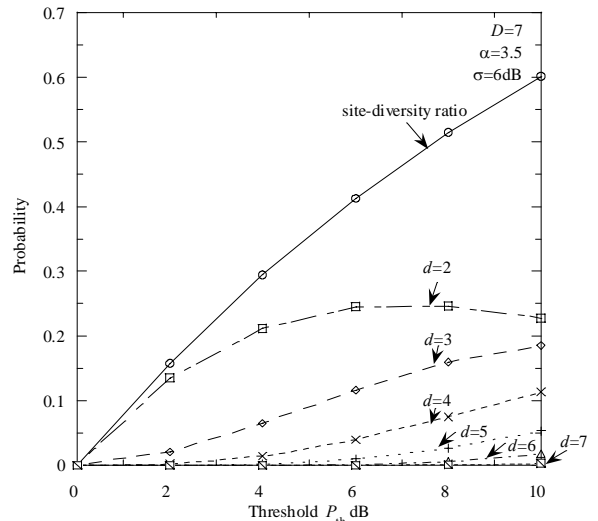


図 10 サイトダイバーシティに参加する基地局数 $d(\leq D)$ に及ぼす閾値の影響

リンク容量に及ぼすシャドウイングの標準偏差 σ の影響を図 8 に示す。シャドウイングの標準偏差 σ が大きくなるにつれて、干渉電力の変動が大きくなり、干渉の影響が大きくなってしまふ。しかし、受信信号電力も変動が大きくなるため、基地局選択によるサイトダイバーシティの効果が大きくなる。そのため、 $\sigma=4\sim 10\text{dB}$ の領域では、リンク容量はほぼ一定となる。シャドウイングの標準偏差の変化は伝搬路減衰指数の変化と比較して、リンク容量に与える影響が小さいことが分かる。

リンク容量に及ぼすサイトダイバーシティに参加する基地局の最大数 D の影響を図 9 に示す。最大値 D が大きくなるにつれて、サイトダイバーシティに参加する基地局数が大きくなるので、サイトダイバーシティ効果は大きくなる。しかし一方で、サイトダイバーシティによって増加するチャンネル数は増加するので干渉増加の影響が大きくなってしまふ。そのため、 D には最適値が存在する。図 9 より、 $D=4$ 以上でリンク容量の大きな変化は見られず一定となっていることが分かる。サイトダイバーシティに参加する基地局数 $d(\leq D)$ に及ぼす閾値の影響を図 10 に示す。図 10 より、閾値 $P_{\text{th}}=0\sim 10\text{dB}$ の範囲では、サイトダイバーシティに参加する基地局が $d=5$ 以上である確率はとても小さくなっていることが分かる。そのため、 $D=4$ 以上における D がリンク容量に与える影響は小さくなるため、リンク容量の大きな変化は見られず一定となっている。

4. むすび

本論文では、シャドウイング環境下において、サイトダイバーシチに参加する基地局を平均受信電力に基づいて決定するときのリンク容量について検討した。サイトダイバーシチの重要な設計パラメータであるサイトダイバーシチを行うかどうかの閾値およびサイトダイバーシチに参加する基地局の最大数がリンク容量に及ぼす影響について計算機シミュレーションで求め、それらに最適値が存在することを明らかにした。さらに、リンク容量に及ぼす伝搬路減衰指数およびシャドウイングの標準偏差の影響についても明らかにした。

シャドウイング環境下における MC-CDMA サイトダイバーシチでは、サイトダイバーシチに参加する最大基地局数を 4 局とし、各セルのユーザのおよそ 30% がサイトダイバーシチを行うような閾値を設定したとき、最も大きなリンク容量の増加が期待できることが分かった。

文 献

- [1] W.C. Jakes, Jr., Ed., *Microwave mobile communications*, Wiley, New York, 1974.
- [2] S. Hara and R. Prasad, "Overview of Multicarrier CDMA," *IEEE Commun., Mag.*, pp.126-144, Dec.1997.
- [3] S. Hara, M. Mouri, M. Okada, and N. Morinaga, "Transmission performance analysis of multicarrier modulation in frequency selective fast Rayleigh fading channel," *Wireless Personal Communications*, vol.2, pp. 335-356, 1996.
- [4] A. Chouly, A. Brajal, and S. Jourdan, "Orthogonal multicarrier techniques applied to direct sequence spread spectrum CDMA system," *Proc. IEEE GLOBECOM'93*, pp. 1723-1728, 1993.
- [5] 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
- [6] H. Atarashi, S. Abeta, M. Sawahashi, "Variable spreading factor-orthogonal frequency and code division multiplexing (VSF-OFCDM) for broadband packet wireless access," *IEICE Trans. Commun.*, vol.E86-B, No.1, pp.291-299, Jan. 2003.
- [7] 井上, 高岡, 安達, "MC-CDMA サイトダイバーシチにおける周波数等化と改善効果," *信学技報 RCS2003-228*, pp.79-84, Nov.2003