

DS-CDMA セルラーシステムの上りリンク容量に 及ぼすシャドウィング相関の影響

アリフ ジュナイディ[†] 工藤 栄亮[†] 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 6-6-05

E-mail: † {arif, kudoh}@mobile.ecei.tohoku.ac.jp, ‡ adachi@ecei.tohoku.ac.jp

あらまし 高速移動通信では周波数選択性フェージングにより伝送特性が劣化してしまうが、DS-CDMA では遅延波を分離合成する RAKE 受信を適用して伝送特性を改善することができる。しかし、同一周波数を多数のユーザが共有するので、上りリンクの場合は、遠近問題によりマルチアクセス干渉が生じ伝送特性が大幅に劣化してしまう。これを解決するために用いられるのが送信電力制御である。DS-CDMA セルラーシステムのリンク容量を求めるには、移動局と各基地局のシャドウィング損失が無相関という仮定がよく用いられている。しかし、移動局のアンテナ高が低く移動局のまわりの遮蔽物の影響を同じように受けることになると、各基地局とのシャドウィング損失に相関が発生してしまう。本論文は、シャドウィング相関が、DS-CDMA セルラーシステムの上りリンク容量に及ぼす影響を、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 DS-CDMA セルラーシステム、上りリンク容量、送信電力制御、シャドウィング相関

Impact of Shadowing Correlation on Reverse Link Capacity of DS-CDMA Cellular System

Arif Junaidi[†] Eisuke KUDOH[†] and Fumiyuki ADACHI[‡]

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: † {arif, kudoh}@mobile.ecei.tohoku.ac.jp, ‡ adachi@ecei.tohoku.ac.jp

Abstract In high-speed mobile communication, the transmission performance is degraded by frequency selective fading channel, but in DS-CDMA it can be improved by employing the Rake receiver. In the reverse link of DS-CDMA, transmit power control (TPC) is an indispensable technique to mitigate the near-far problem. Independent shadowing losses are often assumed for evaluating the link capacity of DS-CDMA cellular systems. However, shadowing losses may be partially correlated since the obstacles surrounding a mobile station block similarly the desired signal and interfering signals. In this paper, we investigate how the shadowing correlation impacts the reverse-link capacity in DS-CDMA cellular system, by computer simulation.

Keyword DS-CDMA Cellular System, Reverse Link Capacity, Transmit Power Control (TPC), Shadowing correlation

1. まえがき

第3世代移動無線通信には直接拡散符号分割多元接続(DS-SS)が採用されている。高速移動通信では周波数選択性フェージングにより伝送特性が劣化してしまうが、DS-SS では遅延波を分離合成する RAKE 受信を適用して伝送特性を改善することができる。しかし、同一周波数を多数のユーザが共有するので、上りリンクの場合は、遠近問題によりマルチアクセス干渉(MAI)が生じ、伝送特性が大幅に劣化してしまう。これを解決するために用いられるのが送信電力制御(TPC: Transmit Power Control)である。

DS-SS セルラーシステムのリンク容量を求めるには、移動局と各基地局のシャドウィング損失が無相関という仮定がよく用いられている。しかし、移動局のアンテナ高が低く、移動局のまわりの遮蔽物の影響を同じように受けることになると、シャドウィング損

失の相関が発生してしまう[1]。TPCを用いる周波数分割多元接続(FDMA)セルラーシステムの上りリンクにおいては、シャドウィング相関大きいほど、周波数利用効率が高くなる[2]。これは、シャドウィング相関が大きくなると、TPCにより干渉電力の変動も抑圧され、大きな干渉電力が生じる確率が小さくなるからである。

本論文では、シャドウィング相関が DS-SS セルラーシステムの上りリンク容量に及ぼす影響を計算機シミュレーションにより明らかにすることを目的としている。[2]では、到来角度に依存しない様なシャドウィング相関を仮定していたが、実際には到来角度差が小さいほど、同一の遮蔽物の影響を受けやすくなるためシャドウィング相関も大きくなると予想される。そこで、本論文では、到来角度に依存するシャドウィング相関モデルを考える[3]。

本論文は以下のように構成されている。第2章はシャドウィング相関及びリンク容量について述べている。第3章は高速 TPC と RAKE 受信を用いる DS-CDMA の上りリンクにおける信号電力対雑音+干渉電力比 (SINR: Signal-to-Noise plus Interference Ratio) の数式表現について述べている。第4章はモンテカルロシミュレーションにより求めたリンク容量について述べている。第5章はむすびである。

2. シャドウィング相関モデルとリンク容量

2.1. シャドウィング相関モデル

標準偏差 σ の対数正規分布に従うシャドウィング損失を仮定する[4]。シャドウィング損失は、建造物により電波が遮蔽されることから発生し、数十メートルから数百メートルの周期で信号電力が不規則変動する現象である。移動局(MS: Mobile Station)のアンテナ高が低く、周りの遮蔽物の影響を同じように受けることになると各基地局(BS: Base Station)までのシャドウィング損失に相関が生じる。

セル# b に存在している MS# $j(b)$ と BS#0 間のチャンネルのシャドウィング損失を $\eta_{j(b),0}$ 、MS# $j(b)$ と BS# b 間のチャンネルのシャドウィング損失を $\eta_{j(b),b}$ で表す。 $\eta_{j(b),0}$ と $\eta_{j(b),b}$ との相関係数 $\rho_{0,b} = E[\eta_{j(b),0}\eta_{j(b),b}] / \sigma^2$ を考える。ここで、 $E[*]$ は集合平均を表す。

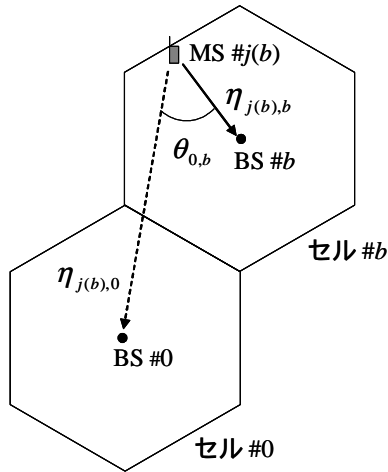


図1 シャドウィング相関のモデル

図1に示すように MS# $j(b)$ から見る BS# b と BS#0 とのなす角度を $\theta_{0,b}$ とする。到来角度差 $\theta_{0,b}$ が小さいほど、電波は同じような伝播路を通過することになり、シャドウィング損失 $\eta_{j(b),0}$ と $\eta_{j(b),b}$ の変動は類似するようになり、シャドウィング相関が大きくなると考えられる。そこで、到来角度差に依存するシャドウィング相関モ

デル[5],[6]を仮定する。このモデルでは相関係数 $\rho_{0,b}$ は次式のように表される。

$$\rho_{0,b} = \begin{cases} A \cos \theta_{0,b} + B & 0^\circ \leq \theta_{0,b} \leq 90^\circ \\ B & 90^\circ < \theta_{0,b} \leq 180^\circ \end{cases} \quad (1)$$

ただし、 $A+B \leq 1$ で、 $A, B \geq 0$ である。 $A=0$ の場合には $\rho_{0,b}=B$ となり、到来角度差に依存しないシャドウィング相関モデルとなる。 $A \neq 0$ の場合は、到来角度差 $\theta_{0,b}$ が小さいほどシャドウィング相関が大きくなる。

2.2. リンク容量

DS-CDMA セルラーシステムでは、同一周波数を多数のユーザが共有しているため、マルチアクセス干渉(MAI)が生じてしまう。この MAI の影響で平均受信 SINR が劣化する。平均受信 SINR が所要 SINR 以下になると通信品質の劣化が生じてしまう。これをアウトエージの発生という。このようなアウトエージが発生する現象を確率事象として捉え、アウトエージ確率と定義する。1セル当りのユーザ数が多いほど、MAI が大きくなり、アウトエージ確率が高くなる。このアウトエージ確率を許容アウトエージ確率以下にできる1セル当りの最大ユーザ数をリンク容量と定義する。

3. DS-CDMA セルラーシステムの上りリンク

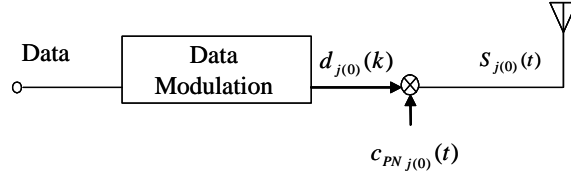
3.1. 送受信系

図2は、希望ユーザ# $j(0)$ が BS#0 と通信を行っているときのユーザ# $j(0)$ の送信機と BS#0 の受信機の構成を示している。本論文では、送受信局間距離の α 乗に比例する伝播損失、対数正規分布するシャドウィング損失、 L パスフェージングチャンネルを仮定している。 M ブランチアンテナ受信ダイバーシチとフィンガー数 L の RAKE 受信を考え、理想的な最大比合成(MRC: Maximal Ratio Combining)を仮定する。

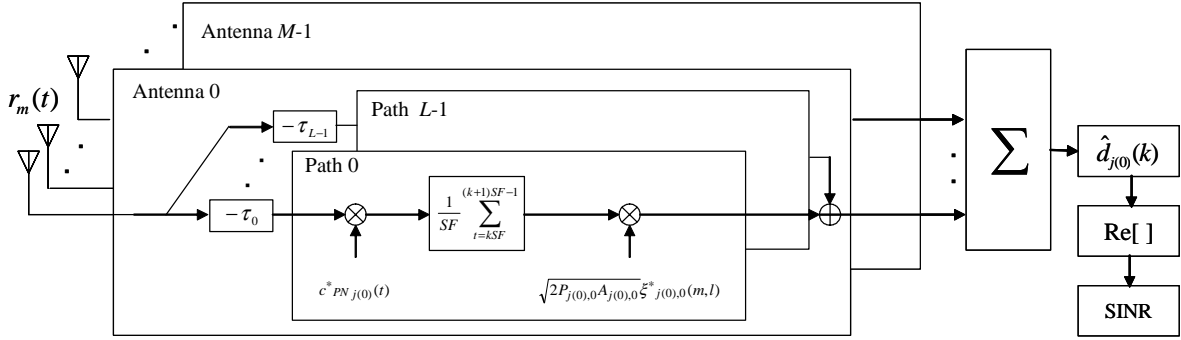
ユーザ# $j(0)$ の送信機では、2値送信データを QPSK 変調し、拡散して送信する。時刻 t における MS# $j(0)$ の送信信号 $s_{j(0)}(t)$ の等価低域表現は次式のように表される。

$$s_{j(0)}(t) = \sqrt{2P_{j(0)}c_{PN_{j(0)}}(t)}d_{j(0)}(\lfloor t/SF \rfloor) \quad (2)$$

ただし、 $P_{j(0)}$ は送信電力、 $c_{PN_{j(0)}}(t)$ は時刻 t の拡散チップ、 $d_{j(0)}(k)$ は k 番目のデータシンボル、 SF は拡散率を表している。また、 $\lfloor x \rfloor$ は x を越えない最大の整数である。



(a) 送信機



(b) 受信機

図 2 DS-CDMA 送受信機

干渉セル数を C , セル当たりのユーザ数を J とする。アンテナ # m における受信信号 $r_m(t)$ の等価低域表現は次式のように表される。

$$r_m(t) = \left\{ \sum_{b=0}^{C-1} \sum_{j=0}^{J-1} \sum_{l=0}^{L-1} \sqrt{2P_{j(b),0}} \xi_{j(b),0}(m,l) \times c_{PNj(b)}(t-\tau_l) d_{j(b)} \left(\left\lfloor \frac{t-\tau_l}{SF} \right\rfloor \right) \right\} + n_m(t) \quad (3)$$

ここで, $\xi(m,l)_{j(b),0}$ はアンテナ # m で観測されるパス# l の複素パス利得である。また τ_l はパス# l の遅延時間を表す。 $n_m(t)$ は時刻 t , アンテナ # m における片側雑音電力密度 N_0 の白色ガウス雑音である。ここで,

$$A_{j(b),0} = r_{j(b),0}^{-\alpha} 10^{\frac{\eta_{j(b),0}}{10}} \quad (4)$$

は, 平均リンク利得であり, $r_{j(b),0}$ はセル半径で正規化した MS-BS 間距離, α はパス損失指数である。

3.2. SINR の数式表現

RAKE 合成出力 $\hat{d}_{j(0)}(k)$ は次式で表される。

$$\hat{d}_{j(0)}(k) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{L-1} \sqrt{2P_{j(0),0}} A_{j(0),0} \xi_{j(0),0}^*(m,l) \times \frac{1}{SF} \sum_{t=kSF}^{(k+1)SF-1} c_{PNj(0)}^*(t-\tau_l) r_m(t) \quad (5)$$

RAKE 合成後の受信 SINR は次式のように与えられる。

$$\frac{S}{N} = \frac{P_{j(0)} T}{N_0} G_{j(0),0} \quad (6)$$

ここで, S は希望信号電力, N は雑音電力, T はデータシンボル長, $G_{j(0),0}$ は次式で与えられる瞬時リンク利得である。

$$G_{j(0),0} = A_{j(0),0} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{L-1} |\xi_{j(0),0}(m,l)|^2 \quad (7)$$

DS-CDMA セルラーシステムの上りリンクでは, 遠近問題やフェージングによる瞬時電力変動を解決する手段として, 高速 TPC が適用される。RAKE 合成後の希望信号電力対雑音電力比(SINR)が一定になるような理想 TPC を仮定する。希望ユーザ # $j(0)$ の送信電力は次式のようになる。

$$P_{j(0)} = \frac{N_0}{G_{j(0),0} T} \left(\frac{S}{N} \right)_{\text{target}} \quad (8)$$

ここで, $(S/N)_{\text{target}}$ は TPC 目標値を表す。ところで, 受信 SINR は, MAI によって劣化するので, TPC 目標値 $(S/N)_{\text{target}}$ は所要平均 SINR Γ_0 よりも大きくしなければならない。そこで, オフセット値として χ を与える[7]。

$$\left(\frac{S}{N} \right)_{\text{target}} = \chi \Gamma_0 \quad (9)$$

式(7)を式(5)に代入して希望信号電力 S 及び干渉+雑音電力 σ_{I+N}^2 を求めると, それぞれ次式のようになる。

$$\begin{aligned}
S &= \left(\frac{S}{N}\right)_{\text{target}} N \\
\sigma^2_{I+N} &= \frac{N \left(\frac{S}{N}\right)_{\text{target}}}{SF} \frac{\sum_{m=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{L-1} |\xi_{j(0),0}(m,l)|^2 \sum_{l' \neq l}^{L-1} |\xi_{j(0),0}(m,l')|^2}{\left\{ \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{L-1} |\xi_{j(0),0}(m,l)|^2 \right\}^2} \\
&+ \frac{N}{SF} \left(\frac{S}{N}\right)_{\text{target}} \sum_{b=0}^C \sum_{i(0) \neq j(0)}^{J-1} \frac{A_{i(b),0}}{A_{i(b),BS(i(b))}} \\
&\times \frac{\sum_{m=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{L-1} |\xi_{j(0),0}(m,l)|^2 \sum_{l'=0}^{L-1} |\xi_{i(b),0}(m,l')|^2}{\left\{ \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{L-1} |\xi_{j(0),0}(m,l)|^2 \right\} \left\{ \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{L-1} |\xi_{i(b),BS(i(b))}(m,l)|^2 \right\}} \\
&+ N
\end{aligned} \tag{10}$$

ここで、 $BS(i(b))$ はセル# b に存在しているMS# $i(b)$ が通信している基地局である。式(9)の σ^2_{I+N} の第1項はパス間干渉(IPI)、第2項はMAI、第3項は雑音電力である。平均受信SINR Γ は次式で与えられる。

$$\Gamma = \frac{S}{E[\sigma^2_{I+N}]} \tag{11}$$

Γ は確率変数である。

4. 数値計算結果

モンテカルロシミュレーションを用いて、SINRのアウトージ確率を求め、リンク容量に及ぼすシャドウィング相関の影響を明らかにする。表1はシミュレーション条件であり、図3はモンテカルロシミュレーションのフローチャートを示している。まず、1セル当り J ユーザをセル内に一様に発生する。パス損失とシャドウィング損失を発生し、アクティブセットとなる K 個の基地局を、平均リンク利得を用いて選択する。通信中に瞬時リンク利得が最大となる基地局をアクティブセットの中から選択するサイトダイバーシチ[8]を行って、通信中の平均受信SINRを計算する。以上の計算を多数回試行して平均受信SINRの累積分布を求め、所要SINR以下になる確率(アウトージ確率)を求める。所要ビット誤り率 P_b を確保するための所要SINRは、次式[9]で求めることができる。

$$P_b = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \sqrt{\frac{\Gamma}{2}} \tag{12}$$

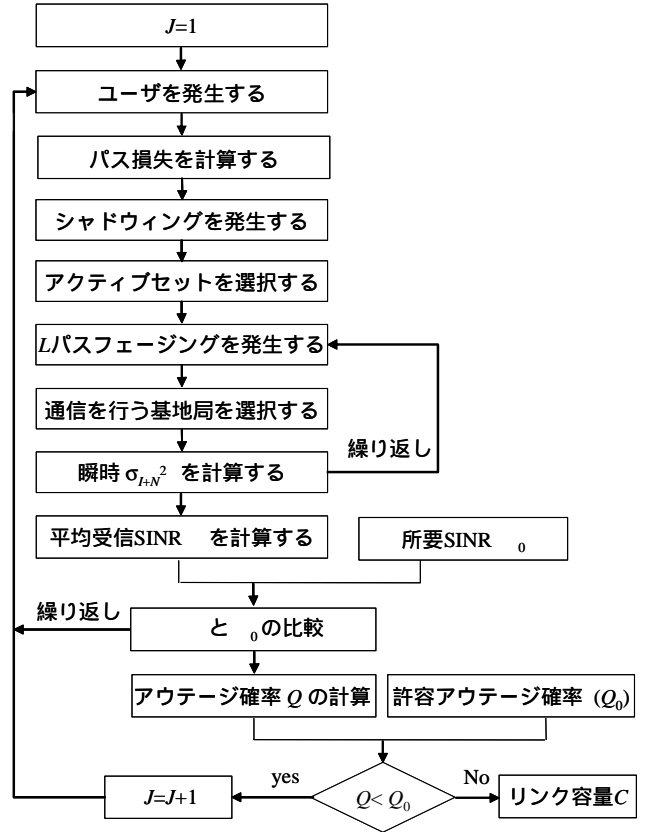


図3 シミュレーションのフローチャート

表1 シミュレーション条件

送信アンテナ本数	1
変調方式	QPSK
拡散率	$SF=64$
セル構成	正六角形
ユーザ分布	一様分布
シャドウィング標準偏差	$\sigma=6 \sim 10$
パス損失指数	$\alpha=3.5$
パス数	$L=2 \sim 8$
干渉セル数	$C=18$
アクティブセット	$K=1 \sim 7$
	10 [dB]
受信アンテナ本数	$M=1 \sim 4$
所要 SINR	$\sigma_0=7.3[\text{dB}] (P_b=10^{-2})$ $\sigma_0=9.8[\text{dB}] (P_b=10^{-3})$

4.1. アウトージ確率

図4は、アウトージ確率に及ぼすシャドウィング相関の影響を示している。横軸は拡散率 SF で正規化した1セル当りのユーザ数 J で、縦軸はアウトージ確率を示している。図4(a)と(b)は、それぞれ $A=0$ の場合と $A \neq 0$ の場合である。実線は所要ビット誤り率 $P_b=0.01$ の場合を示し、破線は $P_b=0.001$ の場合を示している。

$A=0$ の場合は到来角度に依存しないシャドウィング
 相関モデルとなる．FDMA の場合と同様に，シャドウ
 イング相関が大きいほどアウトージ確率が改善される
 ことが分かる．この理由は以下のように説明すること
 ができる．シャドウィング相関が大きいほど，全ての基
 地局へ与える干渉電力が同じようなシャドウィング変
 動を受けるようになる．希望 BS における受信電力変
 動が小さくなるように送信電力制御されるので，他の
 BS において受信される干渉電力の変動も小さくなる．
 式(10)の σ_{I+N}^2 の MAI 項に注目すると，

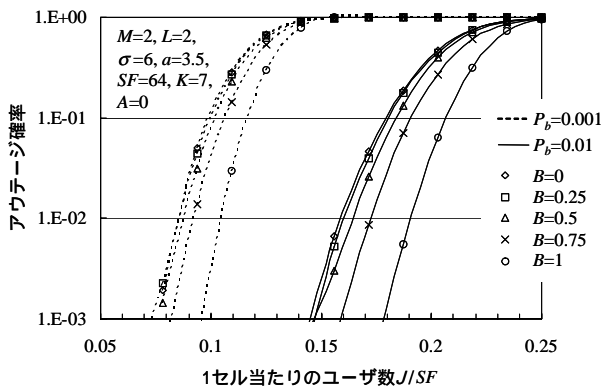
$$\frac{A_{j^{(b),0}}}{A_{j^{(b),b}}} = \frac{r_{j^{(b),0}}^{-\alpha} 10^{\frac{\eta_{j^{(b),0}}}{10}}}{r_{j^{(b),b}}^{-\alpha} 10^{\frac{\eta_{j^{(b),b}}}{10}}} = \left(\frac{r_{j^{(b),0}}}{r_{j^{(b),b}}} \right)^{-\alpha} 10^{\frac{\Delta}{10}} \quad (13)$$

であり，

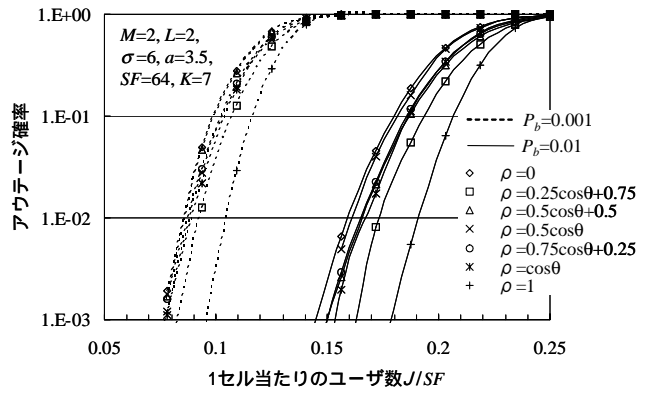
$$E[\Delta^2] = E[(\eta_{j^{(b),0}} - \eta_{j^{(b),b}})^2] = 2\sigma^2(1 - \rho_{0,b}) \quad (14)$$

となるので，シャドウィング相関 $\rho_{0,b}$ が大きいほど
 $E[\Delta^2]$ が小さくなる．したがって，シャドウィング相関
 が大きくなると，干渉電力の変動が小さくなる．よっ
 て，大きい干渉が発生する確率が減少するから平均受
 信 SINR が低下する確率が小さくなるため，アウト
 ージ確率が改善される．なお， $B=0.5$ 以下のときは，
 無相関($\rho=0$)の特性とほぼ等しい．

次に， $A \neq 0$ の場合について考察する．シャドウ
 イング相関が $\rho = A \cos \theta + B$ のときのアウト
 ージ確率は $\rho = B$ のときとほぼ等しいことが分かる．すなわち，本論文
 で仮定したシャドウィング相関モデルでは，リンク容
 量は到来角度差に関するパラメータ A にほとんど影響
 されないと言える．



(a) $A=0$ の場合



(b) $A \neq 0$ の場合
 図 4 シャドウィング相関の影響

4.2. リンク容量

図 5 は，シャドウィング標準偏差 の関数としてプ
 ロットした正規化リンク容量 C/SF を示している．こ
 こで，所要ビット誤り率 $P_b=0.01$ ，許容アウト
 ージ確率 $Q_0=0.1$ ，受信アンテナ本数 $M=2$ ，伝播路のパス数 $L=2$
 である． ρ が大きいほどシャドウィング相関がリンク
 容量に与える影響が大きくなる． $\rho=1$ のときは ρ の値
 にかかわらず，リンク容量は一定である．これは，式
 (14)から分かるように TPC によりシャドウィング損失
 が干渉電力に与える影響をゼロにできるからである．
 また， ρ が大きいほど， $\rho \neq 1$ のとき，リンク容量は小
 さくなる．これは，干渉電力の変動が大きくなり，平
 均受信 SINR が所要 SINR 以下となる確率が大きくな
 るからである．

図 6,7,8 はそれぞれ，アクティブセット数 K の関数，
 パス数 L の関数，受信アンテナ本数 M の関数としてプ
 ロットした正規化リンク容量 C/SF を示している．こ
 れらの図から分かるように， K, L, M の値によらず，リ
 ンク容量は到来角度差に関するパラメータ A にほとん
 ど影響されないことが分かる．

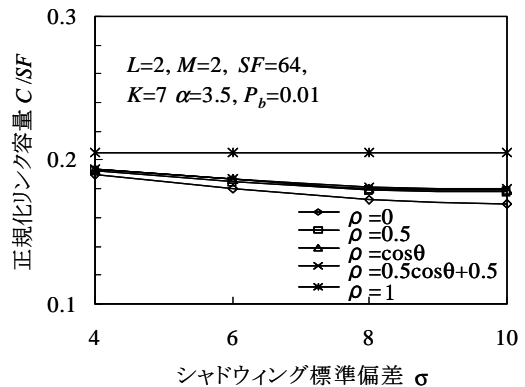


図 5 シャドウィング標準偏差 の影響

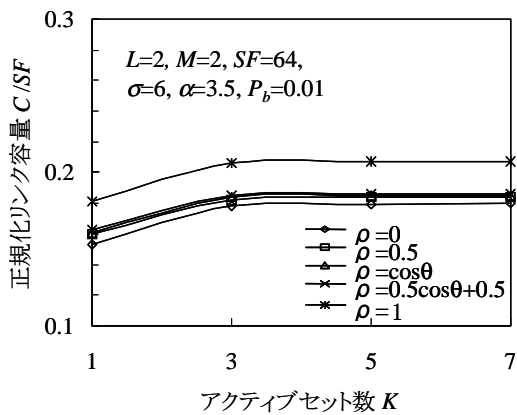


図 6 アクティブセット数 K の影響

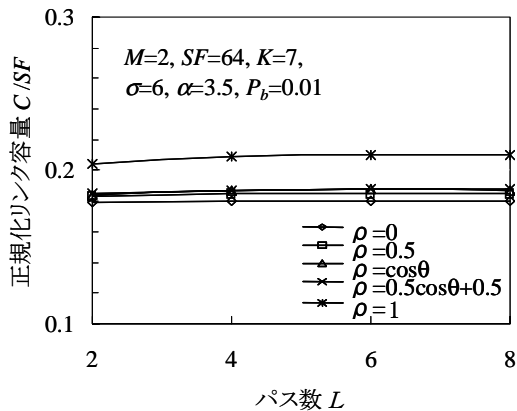


図 7 伝播路のパス数 L の影響

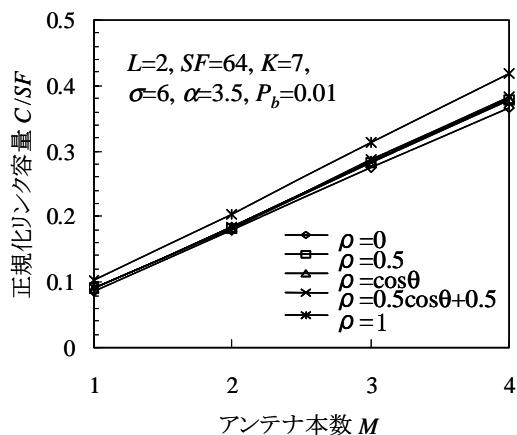


図 8 受信アンテナ本数 M の影響

5. むすび

本論文では、より現実に近い到来角度に依存するシャドウィング相関モデルを仮定して、高速 TPC と RAKE 受信を用いる DS-CDMA セルラーシステムの上りリンク容量に及ぼすシャドウィング相関の影響を明らかにした。本論文で得られた結果をまとめると、以下のようになる。

- (1) 本論文で用いたシャドウィング相関モデルでは、リンク容量は到来角度差にほとんど依存しない。
- (2) シャドウィング相関 ρ が大きいほど、上りリンク容量は増加する。

本論文では、シャドウィング相関モデル $\rho=A\cos\theta+B$ を用いたが、今後は他のモデルを用いたときのリンク容量についても検討する。

文献

- [1] M. Gudmundson, "Correlation Model for Shadow Fading in Mobile Radio System," *Electronics Letters*, vol.27, pp.2145-2146, Nov. 1991.
- [2] K. Sawa, E. Kudoh, and F. Adachi, "Impact of Shadowing Correlation on Spectrum Efficiency of a Power Controlled Cellular Systems," *IEICE Trans. Commun.*, vol.E87-B, No.7, July 2004.
- [3] W.C. Jakes, Jr., ed., "Microwave mobile Communication," John Wiley, 1974.
- [4] A. J. Viterbi, M. Viterbi, K. S. Gilhousen, and E. Zehavi, "Soft Handoff Extends CDMA Cell Coverage and Increase Reverse Link Capacity," *IEEE Journal on Selected Areas in Commun.*, vol.12, no.8, October 1994.
- [5] F. Graziosi, F. Santucci, "A General Model for Shadow Fading in Mobile Radio Systems," *IEEE Commun. Letters*, vol.6, no.3, March 2002.
- [6] F. Graziosi, M. Pratesi, M. Ruggieri, and F. Santucci, "A Multicell Model of Handover Initiation in Mobile Cellular Networks," *IEEE Trans. On Vehicular Tech.*, vol.48, no.3, May 1999.
- [7] 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, May 2002.
- [8] M. Alam, E. Kudoh, and F. Adachi, "Reverse Link Performance of Site Diversity based Transmit Power Control with Antenna Diversity and Rake Combining in DS-CDMA Mobile Radio," 信学会総大, B-5-149, 2004年3月。
- [9] J. G. Proakis, "Digital Communications," 4th ed., New York, McGraw Hill, 2000.