

DS-CDMA/TDD 無線パケットセルラーシステムにおける ランダム送信電力制御の効果

王 智森 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 05

E-mail: wang@mobile.ecei.tohoku.ac.jp, kudoh@mobile.ecei.tohoku.ac.jp, adachi@ecei.tohoku.ac.jp

あらまし 無線パケット通信では、適当な受信電力変動があればキャプチャ効果が得られる。筆者らは、ランダムターゲットを用いるランダム TPC を提案してきた。ランダム TPC は、キャプチャ効果が得られるような適切な受信電力変動を与えることができるので、フェージングチャネルのパス数に依存せず、従来の低速、高速 TPC よりも大きなリンク容量を得られることが特徴である。本報告では、DS-CDMA/TDD 無線パケットセルラーシステムのリンク容量を計算機シミュレーションにより求め、最適な電力ゆらぎの大きさ及びその確率を明らかにするとともに、各種伝搬パラメータの影響を明らかにしている。その結果、電力ゆらぎ及びその確率を最適にすれば、ランダム TPC ではいずれの伝搬条件でも、低速 TPC 高速 TPC よりも大きなリンク容量が得られることが分かった。

キーワード 無線パケット通信, キャプチャ効果, 送信電力制御, Rake 受信, スロットアロハ, DS-CDMA, リンク容量

Performance Evaluation of Random Transmit Power Control for DS-CDMA/TDD Cellular Packet Mobile Radio

ZhiSen WANG, Eisuke KUDOH and Fumiyuki ADACHI

Dept. of Electrical and Communication Engineering, Graduate School of Engineering, Tohoku University
05 Aza-Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai, 980-8579 Japan

wang@mobile.ecei.tohoku.ac.jp, kudoh@mobile.ecei.tohoku.ac.jp, adachi@ecei.tohoku.ac.jp

Abstract It is known that in wireless packet communications the so called capture effect can be expected if the received signal is given certain power variations. Previously we have proposed a random TPC method. In this method, since received signal power variations are intentionally given in order to obtain capture effect, the link capacity is much larger than that of the conventional fast and slow TPC schemes irrespective of the number of propagation paths. In this paper, the link capacity of DS-CDMA/TDD packet cellular system with random TPC is evaluated by computer simulation and the impacts of various propagation parameters are discussed. The results show that the proposed random TPC scheme provides larger link capacity than the conventional fast and slow TPC schemes under any propagation condition.

Keyword packet communication, capture effect, transmit power control, slotted ALOHA, DS-CDMA, Link capacity

1. まえがき

これからの無線通信ではインターネット系のマルチメディアサービスを行うためにパケット通信が主流になると予想される。これに応えるため、高速パケットデータ通信を可能にした第3世代移動通信システム (IMT-2000 システム) が標準化された。IMT-2000 システムでは DS-CDMA 無線技術が採用されている [1]。

無線パケット通信では、適当な受信電力変動があれば、キャプチャ効果が得られるので、リンク容量が増大する [2,3]。ところで、DS-CDMA では干渉電力を抑圧するために Rake 受信と送信電力制御 (TPC) を用いることが必須である。TPC には、シャドウイング変動に

追従する低速 TPC と、フェージング変動に追従する高速 TPC とがある。高速 TPC では瞬時受信電力を一定にするのでキャプチャ効果を期待できない。低速 TPC はシャドウイング問題のみを解決して、フェージングによる受信電力変動の抑圧を Rake 受信に任せている。キャプチャ効果が得られる程度の受信電力変動を残すことができるので、低速 TPC は高速 TPC よりもリンク容量を大きくできる [4]。そこで、キャプチャ効果が期待できるような電力変動を常に得るために、受信電力に強制的にゆらぎを与えるランダム TPC を提案した。シングルセルにおけるランダム TPC を用いる DS-CDMA システムのリンク容量は高速 TPC や低速 TPC を用いた場合よりも大きくできることを示した

[4].ところで、基地局受信電力にゆらぎを与えるためには、移動局側で伝搬路損を知らなければならない。上りと下りリンクで同じ周波数を用いる TDD では、伝搬路の推定が可能である。

ところで、セルラーシステムでは、他セルからの干渉が発生するため、他セル干渉によるリンク容量の劣化が発生する。また、シングルセルの場合には、距離に依存するパスロスとシャドウングロスが TPC により補償されるが、マルチセルの場合には、他セル干渉がこれらの影響を受けることになる。そこで、本論文では、DS-CDMA/TDD を対象に、マルチセル環境におけるランダム TPC の特性を計算機シミュレーションにより評価する。

本論文は以下のように構成されている。第 2 章で DS-CDMA/TDD システムにおけるランダム TPC を述べ、第 3 章でマルチセル環境におけるリンク容量の計算手法を簡単に示す。第 4 章では、シミュレーション条件及びシミュレーション結果を述べ、マルチセルにおける DS-CDMA/TDD システムの上りリンク容量に及ぼすランダム TPC の効果について考察する。第 5 章はむすびである。

2. DS-CDMA/TDD システムにおけるランダム TPC

まず高速 TPC を考える。理想最大比合成(MRC)を用いる Rake 受信を仮定する。フェージングチャンネルは遅延時間がそれぞれ異なる L 個の独立に変動するパスで構成されているものとする。基地局での Rake 受信後の瞬時信号電力 P_R は次式で表される。

$$P_R = P_T r^{-\alpha} 10^{-\eta/10} \sum_{l=0}^{L-1} |\xi^{(l)}|^2 \quad (1)$$

ここで、 P_T は移動局の送信電力、 r は移動局と基地局間の距離、 α はパスロス指数、 η はシャドウングロス (dB)、 $\xi^{(l)}$ はパス l の複素パス利得、 l はパス番号である。ただし、 $E[\sum_{l=0}^{L-1} |\xi^{(l)}|^2] = 1$ とする。ここで、 $E[\cdot]$ は集

合平均を表す。高速 TPC のターゲット値を P_{target} とする。基地局での受信信号電力 P_R が $P_R = P_{\text{target}}$ になるように移動局の瞬時送信電力 P_T が制御される。従って、 P_T は次式になる。

$$P_T = P_{\text{target}} \left[r^{-\alpha} 10^{-\eta/10} \sum_{l=0}^{L-1} |\xi^{(l)}|^2 \right]^{-1} \quad (2)$$

ランダム TPC では、図 1 に示すように、強制的に確率 ε_{\pm} ($\varepsilon_+ + \varepsilon_- = 1$) で移動局の送信電力に $\pm \Delta$ dB の揺ぎを与える。すなわち、基地局での受信電力は確率 ε_{\pm} で $P_{\text{target}} \pm \Delta$ (dB) になるように制御される。従って、移動局の瞬時送信電力 \tilde{P}_T は次式のように表される。

$$\tilde{P}_T = P_T 10^{\pm \Delta/10} \quad (3)$$

送信電力 \tilde{P}_T を決定するため、伝搬路損

$$\left[r^{-\alpha} 10^{-\eta/10} \sum_{l=0}^{L-1} |\xi^{(l)}|^2 \right]^{-1}$$

を推定しなければならない。TDD システムを仮定する。図 2 に TDD システムのタイミング構成を示す。TDD システムでは、上りリンク(移動局から基地局)と下りリンク(基地局から移動局)は同一周波数を使用するので、伝搬路損が同じである。そこで、基地局は周期的に既知の電力 P_{BTp} でパイロット信号を送信すれば、移動局で受信パイロット信号の瞬時電力 P_{MRp} を測定することで、伝搬路損

$$\left[r^{-\alpha} 10^{-\eta/10} \sum_{l=0}^{L-1} |\xi^{(l)}|^2 \right]^{-1}$$

を推定できる。従って、ランダム TPC の送信電力は移動局が次式により自律的に決定できる。

$$\tilde{P}_T = P_{\text{target}} \left(\frac{P_{BTp}}{P_{MRp}} \right) 10^{\pm \Delta/10} \quad (4)$$

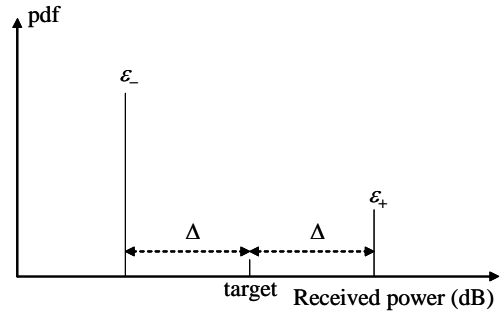


図 1. ランダム TPC の受信電力分布

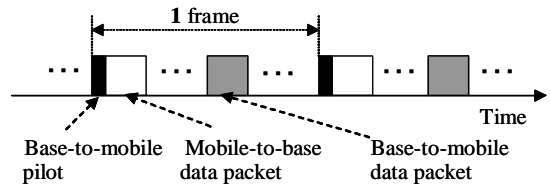


図 2. TDD システムのタイミング構成

3. マルチセルの場合のリンク容量

パケット通信では、受信パケットに誤りを検出したとき再送要求する自動再送要求 (ARQ) が用いられる。非リアルタイム系通信を対象とし、再送回数を制限しない ARQ を考える。シングルセルの場合のリンク容量の算出法は文献[4,5]に示されている。マルチセルの場合には、以下に示す信号電力対干渉電力比 γ_k を用いて、同様にリンク容量を求めることができる。

j 番目の基地局で k 局の移動局のパケットが衝突しているときの受信信号 $r_j(t)$ は、等価低域表現を用いると次式のように表される。

$$r_j(t) = \sum_{i=0}^{k-1} \sqrt{2\tilde{P}_{Ti} r_{i-j}^{-\alpha} 10^{-\eta_{i-j}/10}} \left(\sum_{l=0}^{L-1} \xi_{i-j}^{(l)} d_i(t - \tau_{i-j}^{(l)}) c_i(t - \tau_{i-j}^{(l)}) \right) \quad (5)$$

ここで、 $\tilde{d}_i(t)$ と $c_i(t)$ はデータシンボルと拡散符号の波形、 $\xi_{i-j}^{(l)}$ 及び $\tau_{i-j}^{(l)}$ はそれぞれ、 i 番目の移動局と j 番目の基地局間の l 番目のパスの複素パス利得及び遅延時間である。

移動局は受信パイロット信号電力が最大となる基地局と通信すると仮定する。理想的に動作する TPC、伝搬路のパス数と等しい数のフィンガ数を持つ理想 Rake 受信を仮定する。 i 番の移動局が通信する基地局番号を $j(i)$ とすると、 $j(i)$ 番の基地局で受信した i 番目の移動局の Rake 受信後の瞬時信号電力 $P_{\text{Rake},i-j(i)}$ は次式で表される。

$$P_{\text{Rake},i-j(i)} = \tilde{P}_{Ti} r_{i-j(i)}^{-\alpha} 10^{-\eta_{i-j(i)}/10} \sum_{l=0}^{L-1} \left| \xi_{i-j(i)}^{(l)} \right|^2 \quad (6)$$

ここで、

$$j(i) = \arg \max_j \left\{ r_{i-j}^{-\alpha} 10^{-\eta_{i-j}/10} \sum_{l=0}^{L-1} \left| \xi_{i-j}^{(l)} \right|^2 \right\} \quad (7)$$

受信電力ゆらぎが δ_i dB であるとき、 i 番の移動局の送信電力 \tilde{P}_{Ti} は次式で表わされる。

$$\tilde{P}_{Ti} = \frac{P_{\text{target}} 10^{\delta_i \Delta / 10}}{r_{i-j(i)}^{-\alpha} 10^{-\eta_{i-j(i)}/10} \sum_{l=0}^{L-1} \left| \xi_{i-j(i)}^{(l)} \right|^2} \quad (8)$$

ここで、 $\delta_i (= 1 \text{ or } -1)$ はゆらぎの状態を表す係数であり、 $\delta_i = +1$ のときには送信電力を δ_i dB 上げ、 $\delta_i = -1$ のときには送信電力を δ_i dB 下げる。また、 $P(\delta_i = \pm 1) = \varepsilon_{\pm}$ である。

雑音の影響を無視できると仮定する。今、一般性を失うことなく、0 番の移動局が 0(0) 番の基地局と通信している場合について考える。0(0) 番の基地局における 0 番の移動局から受信 SIR は次式で表される。

$$\gamma_k = \frac{2SF \left(\sum_{l=0}^{L-1} \left| \xi_{0-0(0)}^{(l)} \right|^2 \right)^2 10^{\delta_0 \Delta / 10}}{\sum_{m=0}^{k-1} \sum_{l=0}^{L-1} \left| \xi_{0-0(0)}^{(l)} \right|^2 \left| \xi_{0-0(0)}^{(m)} \right|^2 10^{\delta_0 \Delta / 10} + \left(\sum_{l=0}^{L-1} \left| \xi_{0-0(0)}^{(l)} \right|^2 \right)^2 \times \sum_{i=1}^{k-1} \left[\left(\frac{r_{i-0}}{r_{i-j(i)}} \right)^{-\alpha} 10^{-\frac{\eta_{i-0} - \eta_{i-j(i)}}{10}} 10^{\delta_i \Delta / 10} \right] \frac{\sum_{m=0}^{L-1} \sum_{l=0}^{L-1} \left| \xi_{i-0}^{(l)} \right|^2 \left| \xi_{0-0(0)}^{(m)} \right|^2}{\left(\sum_{m=0}^{L-1} \left| \xi_{i-j(i)}^{(m)} \right|^2 \right)^2}}$$

4. 計算機シミュレーション

モンテカルロシミュレーションにより上りリンク容量を求める。表 1 にシミュレーション諸元を示す。上りリンク容量を導出するモンテカルロシミュレーションの手順は以下の通りである。

- ステップ アクティブ移動局数 K を $K=1$ に設定する。
- ステップ アクティブ移動局の位置とアクティブ移動局と各基地局間の伝搬路損を決定し、通信を行う基地局を決定する。
- ステップ アクティブ移動局数が K のときのスループットを文献[4,5]に示された手法により求める。
- ステップ ~ を繰り返して、スループットが所要スループットより小さくなる確率(劣化率 Q)を求める。
- ステップ $Q < Q_{\text{allow}}$ (許容劣化率)であれば、アクティブ移動局を一局増加させて、に戻る。 $Q > Q_{\text{allow}}$ となれば、シミュレーションをストップする。

$Q \leq Q_{\text{allow}}$ を満たす最大のアクティブ移動局数 K がリンク容量 C である。

表 1 シミュレーション諸元

User distribution		Uniform
Propagation channel	Fading	Block Rayleigh
	Number of paths	$L=1 \sim 16$
Transmitter and receiver	Data modulation and demodulation	Coherent BPSK
	Spreading factor	$SF=1 \sim 256$
Packet	Length	$N=512 \sim 4096$ bits
	Data packet generation probability	$\lambda_0=0.01 \sim 0.1$
QoS	Required throughput	$S_{\text{req}}=0.9$
	Allowable outage probability	$Q_{\text{allow}}=0.1$

4.1. ゆらぎ とゆらぎ確率 ε_{\pm} の影響

図 3 に $SF=32$ の場合について、ゆらぎ Δ 対拡散率 SF で正規化したリンク容量の関係を示す。ゆらぎが大きくなるとキャプチャ効果が大きくなるのでリンク容量も大きくなる。しかし、ゆらぎ Δ が 3.75dB 以上になると移動局間の受信電力差が大きくなり過ぎ、干渉によるパケット誤りの増加がキャプチャ効果をオフセットしてしまうため、リンク容量が小さくなる。リンク容量が最大となる Δ は 3.75dB になり、シングルセルの場合より大きい。マルチセルの場合には他セルからの干渉が生じるので、干渉電力のゆらぎも大きくなる。従って、キャプチャ効果を最大にするためにはゆらぎも大きくしなければならぬからである。

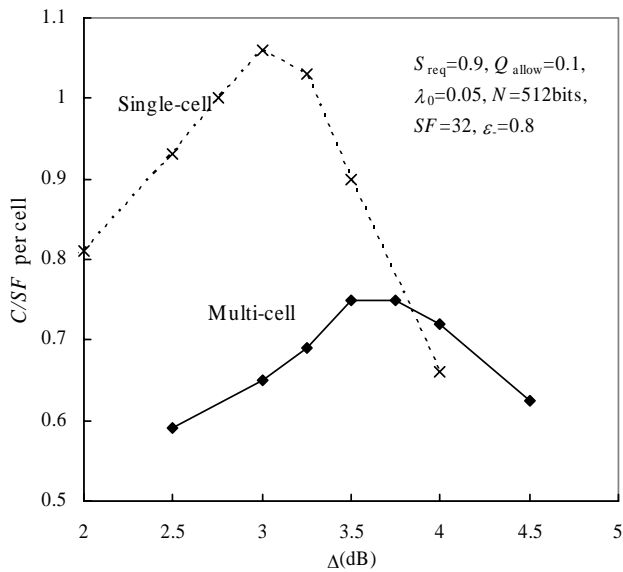


図 3 . ゆらぎ 対正規化リンク容量 C/SF

図 4 に $\Delta=3.5\text{dB}$, $SF=32$ であるときのゆらぎ確率 ϵ_- 対正規化リンク容量を示す . ゆらぎ確率 ϵ_- が 0 または 1 のときには , 受信電力が全て同じになるから , 高速 TPC のリンク容量と等しくなる . $0 < \epsilon_- < 1$ では , キャプチャ効果が得られるので , 高速 TPC よりもリンク容量が大きくなる . ϵ_- が 0.75~0.8 のときに正規化リンク容量が最大 ($C/SF=0.75$ per cell) になり , 低速 TPC のそれより大きくなる . また , シングルセルの場合と同様に $\epsilon_- = 0.8$ 付近で最大となる .

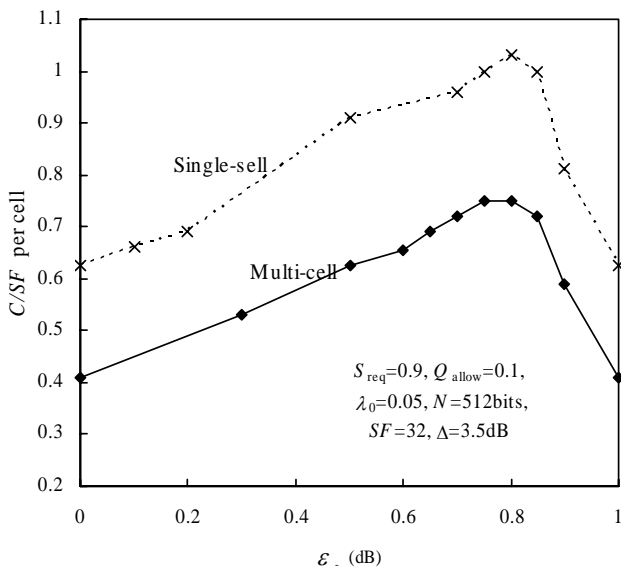


図 4 . ゆらぎ確率 ϵ_- 対正規化リンク容量 C/SF

4.2. パス数の影響

パス数の影響を図 5 に示す . 低速 TPC ではリンク容量がパス数 L に大きく依存している . これは Rake 受信後の受信電力変動がパス数に依存するからである . ランダム TPC ではマルチセルの場合でもリンク容量は殆どパス数に依存せず , 低速 TPC よりも常に大きな

リンク容量が得られることが分かる .

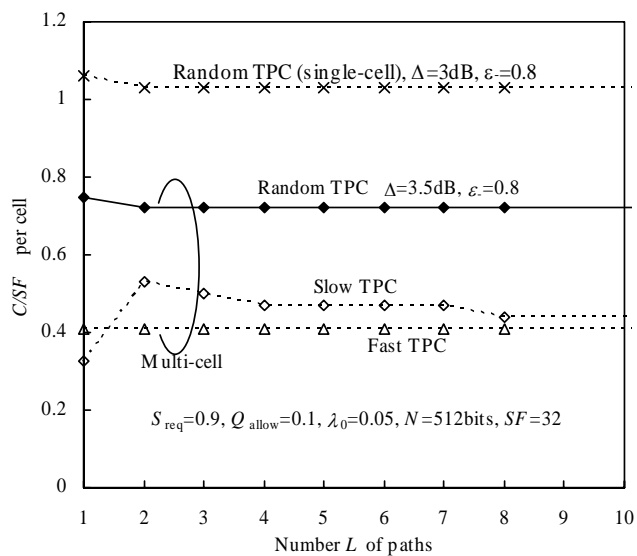


図 5 . パス数対リンク容量

4.3. 拡散率 SF の影響

図 6 に拡散率対正規化リンク容量を示す . 拡散率が 4 以下では , パス間干渉が大きいいためリンク容量は殆ど 0 である . 拡散率 SF が 4 以上になるとランダム TPC のリンク容量が低速 TPC の場合よりも大きくなる . SF が 64 以上になるとパス間干渉による劣化が殆ど無視できるから , リンク容量は一定になる .

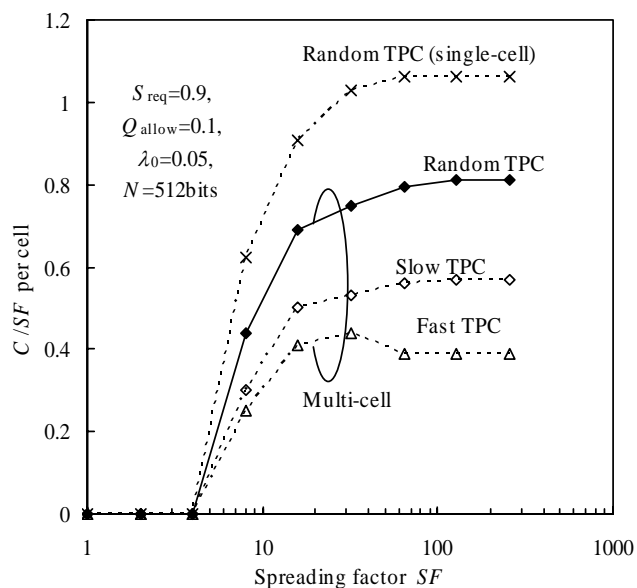


図 6 . 拡散率 SF 対正規化リンク容量 C/SF

4.4. パスロス指数 の影響

パスロス指数 の影響を図 7 に示す . が大きいほど , 他セルからの干渉電力の減衰が大きくなるため , リンク容量が大きくなる . ランダム TPC のリンク容量は高速 TPC と低速 TPC のリンク容量よりも大きい .

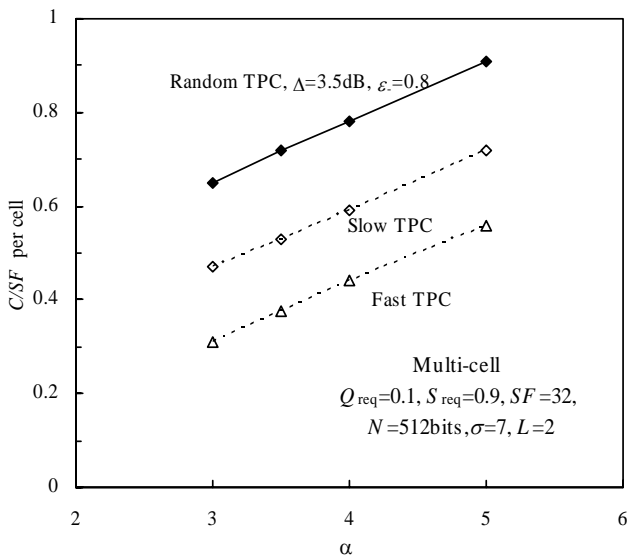


図7. パスロス指数 対正規化リンク容量 C/SF

4.5. シャドウングの標準偏差 σ の影響

シャドウングの標準偏差 σ の影響を図8に示す。シャドウングの標準偏差 σ が大きいほど、干渉電力のゆらぎが大きくなるため、リンク容量が小さくなる。しかしながら、リンク容量の低下は非常に緩慢である。これは、 σ が大きいほど、受信信号変動が大きくなるため、基地局選択におけるサイトダイバシチ効果が大きくなり、基地局選択ダイバシチ効果が他セルからの干渉増大による容量劣化を抑制できるからである。

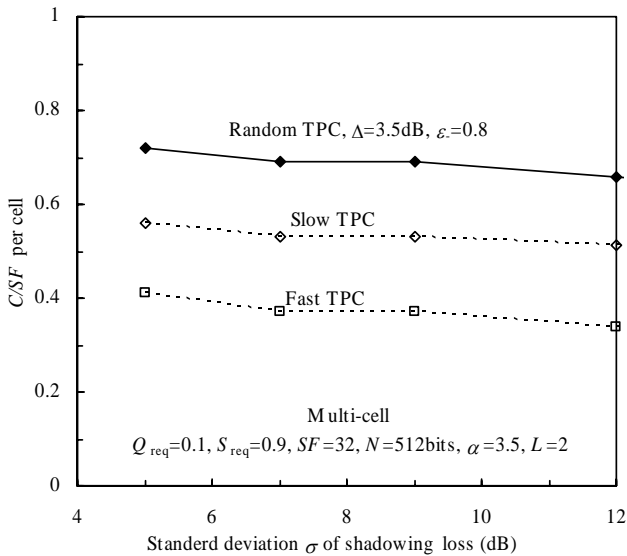


図8. シャドウングの標準偏差 σ 対正規化リンク容量 C/SF

5. 結び

ランダム TPC を用いる DS-CDMA/TDD 無線パケット通信上りリンクを対象にマルチセル環境におけるリ

ンク容量を計算機シミュレーションにより求めた。その結果、以下のことが明らかになった。

ランダム TPC では低速 TPC 高速 TPC よりも大きなリンク容量が得られる。

リンク容量を最大とするためには、マルチセルの方がシングルセルの場合に比べゆらぎを大きくしなければならない。

パスロス指数が大きいほどリンク容量が大きくなる。また、シャドウングの標準偏差 σ が大きくなるとリンク容量が低下するが非常に緩慢である。

参考文献

- [1] F. Adachi, M. Sawahashi, and H. Suda, "Wideband DS-CDMA for Next-Generation Mobile Communication System," IEEE Commun. Mag., Vol.36, pp.56-59, Sept. 1998.
- [2] I. Widipangestu, A. Jong, and R. Prasad, "Capture probability and throughput analysis of slotted ALOHA and unslotted np-ISMA in a Rician/Rayleigh environment," IEEE Trans. Veh. Technol., Vol. 43, No. 3, pp.457-465, Aug. 1994.
- [3] T. Ojanperä and R. Prasad, *Wideband CDMA for third generation mobile communication*, Artech House, 1998.
- [4] Z. S. Wang, E. Kudoh and F. Adachi, "Uplink link capacity of DS-CDMA packet mobile communication with rake combining and transmit power control," IEICE Trans. Commun., Vol. E86-B, No.7, pp.2203-2206, July 2003.
- [5] Z.S. WANG, E. Kudoh and F. Adachi, "Effect of fluctuated transmit power Control on up link capacity of DS-CDMA Packet Mobile communication," 信学技報, RCS2003-32, pp.15~19, 2003年5月。
- [6] J.G. Proakis, *Digital communications*, 3rd ed., McGraw-Hill, 1995.