

# DS-CDMA 無線パケット通信における 強制的にゆらぎを与える高速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 〒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** DS-CDMA 無線パケット通信では、低速送信電力制御(TPC)を用いると高速マルチパスフェージングによる受信電力変動が残留するのでキャプチャ効果が得られる。このため高速 TPC よりも大きなリンク容量が得られる。そこで、本論文では、スロットアロハを対象に受信電力ターゲット値に強制的にゆらぎを与えてキャプチャ効果を得る TPC 法を提案する。計算機シミュレーションによりリンク容量を明らかにし、伝搬路のパス数にかかわらず低速 TPC よりも大きいリンク容量が得られることを示す。

**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

## Effect of Fluctuated Transmit Power Control on Uplink Link Capacity of DS-CDMA Packet Mobile Communication

ZhiSen WANG, Eisuke KUDOH and Fumiyuki ADACHI

Dept. of Electrical and Communication Engineering Graduate School of 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** In DS-CDMA packet mobile communications, slow transmit power control (TPC) was found to provide a link capacity larger than fast TPC. This is because, with slow TPC, the received signal power variations due to fading remain intact and this results in a larger capture effect. This paper proposes a new fast TPC that changes TPC target randomly in order to obtain the capture effect. It is confirmed by computer simulation that proposed TPC achieves larger link capacity than conventional slow TPC.

**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、移動局がパケットをランダムに送信するので、パケット衝突が発生し、スループットが劣化してしまう。ところで、衝突した複数のパケット間の受信電力差が小さい場合には全てのパケットが損失してしまうが、パケット受信電力差が大きい場合には受信電力の大きなパケットの伝送は成功するというキャプチャ効果が得られ、衝突によるスループット低下を緩和できることが知られている[2,3]。ところで、DS-CDMA では、マルチパスフェージングを抑圧するために 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 では受信電力が一定にな

ってしまう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適度な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、本論文では、スロットアロハを対象にして、キャプチャ効果が期待できるような電力変動を得るために、受信電力ターゲット値に強制的にゆらぎを与える高速 TPC 法を提案し、そ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する。第2章で強制的にゆらぎを与える高速 TPC 法を述べ、第3章でスループットと劣化率について述べ、スループットの計算手法を簡単に示す。第4章で受信信号電力対雑音+干渉電力比(SINR)の数式表現を示す。第5章では、リンク容量を求める計算機シミュレーション手法及びシミュレーション結果を述べ、上りリンク容量に及ぼす提案 TPC の効果について考察する。第6章はむすびである。

## 2. 強制的にゆらぎを与える高速 TPC

上下リンクで同一の周波数を利用する TDD(Time division duplex)を考える．図 1 のように，基地局は定期的にパイロット信号を送信する．移動局は受信したパイロット信号によりチャネル利得を推定し，図 2 に示すように基地局での Rake 合成後の受信電力が確率  $\varepsilon_-$  でターゲット値より dB 小さく， $\varepsilon_+ (=1-\varepsilon_-)$  の確率でターゲット値より dB 大きくなるように  $i$  番の移動局の送信電力  $P_i$  を制御する．

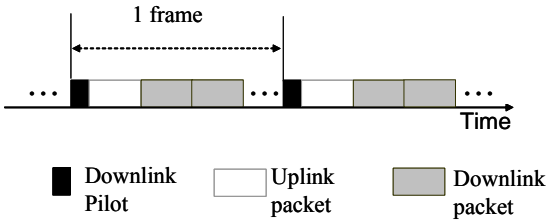


図 1 フレーム構成

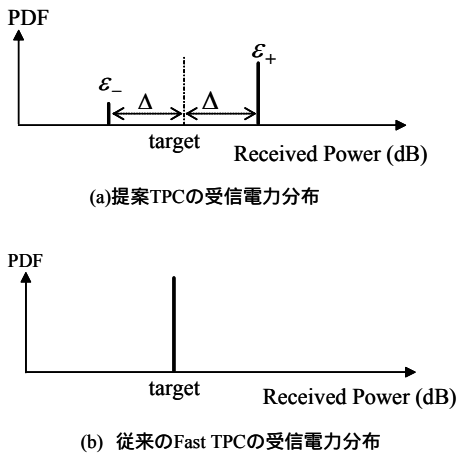


図 2 TPC 方式の受信電力分布

## 3. スループット

### 3.1. スループットと劣化率及びリンク容量の関係

移動通信ではサービスエリアが面的に広がっているため，サービスエリア内の全ての場所において所要のサービス品質(QoS)を確保することは困難である．そこで，実際には，ある確率で所要の QoS を満たさなくなることを許容したシステム設計が行われる．ここで，所要の QoS を満たさなくなる確率を劣化率，許容される劣化率を許容劣化率と呼ぶ．

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．この場合は最終パケット誤り率を 0 にすることができるので所要のスループットを満たさないときに品質劣化となる．スループット  $S$  は次式で与えられる．

$$S = 1 - p(K, \lambda) \quad (1)$$

ここで， $p(K, \lambda)$  は平均パケット誤り率であり， $K$  はアクティブ移動局数， $\lambda$  は再送パケットを含めたパケット発生率である．所要スループットを  $S_{req}$  としたとき，劣化率  $Q$  は次式で定義される．

$$Q = \text{Prob}[S < S_{req}] \quad (2)$$

パケット通信に参加しているアクティブ移動局数が多くなるにつれ干渉電力が増加するため，劣化率も増加する．許容劣化率  $Q_{allow}$  を超えない最大のアクティブ移動局数を，本論文ではリンク容量と定義している．

### 3.2. スループットの計算手法

ARQ を用いるときには再送パケットが存在するから，送信パケットには真のパケットと再送パケットが混在することになる．パケット誤り率を求めるためには真のパケットと再送パケットの和の発生率を知らなければならない．本論文では，再送を含めたパケット発生がランダムであると仮定(実際には再送パケットはランダムではないが，再送がランダムに近くなるように再送パケットの送信時刻をランダム化しているものとする)して，真のパケット発生率が  $\lambda_0$  であるときの再送を含めたパケット発生率  $\lambda$  を以下のように求める．

TPC を用いる場合には，全移動局の平均パケット誤り率は等しくなるので，再送を含めたパケット発生率も等しくなる．真のパケット発生率が  $\lambda_0$  であるとき，再送を含めたパケット発生率  $\lambda$  と平均パケット誤り率  $p(K, \lambda)$  は次式の関係にある．

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{1 - p(K, \lambda)} \quad (3)$$

ここで， $p(K, \lambda)$  は次式により計算できる．

$$p(K, \lambda) = \sum_{k=0}^{K-1} p(k) \cdot \binom{K-1}{k} \lambda^k (1-\lambda)^{K-1-k} \quad (4)$$

ここで， $p(k)$  は  $k$  局の移動局のパケットが衝突しているときの条件付平均パケット誤り率，

$$\binom{K-1}{k} = \frac{(K-1)!}{k!(K-k-1)!}$$

は 2 項係数である．

ところで，式(3)は，平均パケット誤り率  $p(K, \lambda)$  と再送を含めたパケット発生率  $\lambda$  が相互に関係していることを示しており，アクティブ移動局数  $K$  と真のパケット発生率  $\lambda_0$  が与えられたときのスループットを求めることが解析的に容易でないことを物語っている．そこで，式(3)を次のように変形する．

$$p(K, \lambda) = 1 - \lambda_0 / \lambda \quad (5)$$

条件付平均パケット誤り率  $p(k)$  が分かれば，再送を含

めたパケット発生率  $\lambda$  のさまざまな値に対する平均パケット誤り率  $p(K, \lambda)$  を式(4)を用いて計算できる． $1 - \lambda_0 / \lambda$  と等しくなる  $p(K, \lambda)$  の値を繰り返しアルゴリズムにより探索する[4]．この値が，真のパケット発生率が  $\lambda_0$  であるときの平均パケット誤り率  $p(K, \lambda)$  を与える．式(1)よりスループットが計算できる．

次にパケット長が  $N$  ビット， $k$  局の移動局が衝突しているときの  $p(k)$  の計算法を示す．Rake 合成後の瞬時信号対(干渉+雑音)電力比(SINR)が  $\gamma_k$  であるときのビット誤り率を  $p_b(\gamma_k)$  とすると，パケット誤り率  $p(k)$  は次式で計算できる．

$$p(k) = 1 - [1 - p_b(\gamma_k)]^N \quad (6)$$

BPSK 同期検波を仮定すると， $p_b(\gamma_k)$  は次式で与えられる[5]．

$$p_b(\gamma_k) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \sqrt{\frac{\gamma_k}{2}} \quad (7)$$

ここで  $\operatorname{erfc}(x) = (2/\sqrt{\pi}) \int_x^\infty e^{-x^2} dx$  は誤差補関数である．

#### 4. SINR の表現

シングルセル及び理想チャネル推定を仮定する．独立な  $L$  個のパスからなる周波数選択性フェージングチャネルを仮定する．干渉による劣化が支配的で熱雑音による劣化を無視できる環境を考える．

$k$  局の移動局のパケットが衝突しているときの受信信号  $r(t)$  は，等価低域表現を用いると以下のように表される[6]．

$$r(t) = \sum_{i=0}^{k-1} \sqrt{2A_i} \left( \sum_{l=0}^{L-1} \xi_{i,l} d_i(t - \tau_{i,l}) c_i(t - \tau_{i,l}) \right) \quad (8)$$

ここで， $A_i$  は  $i$  番の移動局からの平均受信電力， $d_i(t)$  と  $c_i(t)$  はデータシンボルと拡散符号の波形， $\xi_{i,l}$  と  $\tau_{i,l}$  はそれぞれ，パス  $l$  の複素パス利得と遅延時間である．ただし，一様電力遅延プロファイルを仮定し， $E[|\xi_{i,l}|^2] = 1/L$  であるものとする．ここで， $E[\cdot]$  は集合平均を表す．伝送速度がフェージングよりも十分速いものとし，1パケット長内で複素パス利得が一定であるブロックフェージングを仮定する． $A_i$  は次式で表すことができる．

$$A_i = P_i r_i^{-\alpha} 10^{-\frac{\eta_i}{10}} \quad (9)$$

ここで  $P_i$ ， $r_i$ ， $\alpha$  及び  $\eta_i$  は，それぞれ  $i$  番の移動局の送信電力，移動局と基地局間の距離，伝搬損失指数(path loss exponent)及びシャドウィング損失(dB)である．

受信電力ターゲット値  $P_{target}$  に対するゆらぎが dB であるとき， $i$  番の移動局の送信電力は次式で表される．

$$P_i = \frac{P_{target} 10^{\frac{\Delta}{10} \delta_i}}{r_i^{-\alpha} 10^{-\frac{\eta_i}{10}} \left( \sum_{l=1}^L |\xi_{i,l}|^2 \right)^2} \quad (10)$$

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 dB 上げ， $\delta_i = -1$  のときには送信電力を dB 下げる． $P(\delta_i = \pm 1) = \varepsilon_{\pm}$  である．雑音による劣化を無視できるように受信電力は熱雑音電力より十分大きいと仮定すると，0 番目の移動局の受信 SINR は次式で表される．

$$\gamma_k = \frac{2SF \left( \sum_{l=0}^{L-1} |\xi_{0,l}|^2 \right)^2 10^{\frac{\Delta}{10} \delta_0}}{\left( \sum_{j=0}^{L-1} \sum_{\substack{l=0 \\ l \neq j}}^{L-1} |\xi_{0,l} \xi_{0,j}^*|^2 10^{\frac{\Delta}{10} \delta_0} + \left( \sum_{l=0}^{L-1} |\xi_{0,l}|^2 \right) \sum_{i=1}^{k-1} 10^{\frac{\Delta}{10} \delta_i} \frac{\sum_{j=0}^{L-1} \sum_{l=0}^{L-1} |\xi_{i,l} \xi_{0,j}^*|^2}{\left( \sum_{j=0}^{L-1} |\xi_{i,j}|^2 \right)^2} \right)} \quad (11)$$

#### 5. 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．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の理想 Rake 受信を仮定している．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 アクティブ移動局数が  $K$  のときのスループットを 3 章で示した方法で求める．
- ステップ 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 ステップ で求めた劣化率  $Q$  が許容劣化率  $Q_{allow}$  以下の場合には，移動局数を  $K+1$  として に戻る．そうでない場合， $K$  をリンク容量とする．

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	$N=512$ bits
	Data packet generation probability	$\lambda_0=0.05$
QoS	Required throughput	$S_{req}=0.9$
	Allowable outage probability	$Q_{allow}=0.1$

提案 TPC 法の受信電力変動はゆらぎ とゆらぎ確率  $\epsilon_-$  に依存するため、 と  $\epsilon_-$  がリンク容量に与える影響を明らかにする。また、Rake 受信効果はパス数に依存するので、パス数  $L$  とリンク容量の関係を求める。更に、拡散率  $SF$  が大きいほど許容干渉電力が大きくなるので、キャプチャ効果は  $SF$  にも依存することが予想される。したがって、 $SF$  とリンク容量との関係についても明らかにする。

### 5.1. ゆらぎ とゆらぎ確率 $\epsilon_-$ の影響

図 3 に  $SF=32$  の場合について、 $\epsilon_-$  をパラメータとしたゆらぎ  $\Delta$  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、ゆらぎが 3dB 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。ゆらぎが 6dB 以上になるとリンク容量はゆらぎに依存せずば一定になる。提案 TPC の最大リンク容量 ( $C/SF=1.03$ ) は、低速 TPC の最大リンク容量 ( $C/SF=0.83$ ) よりも大きい。これは、提案 TPC では大きなキャプチャ効果が最適に得られるような電力変動を強制的に与えているからである。

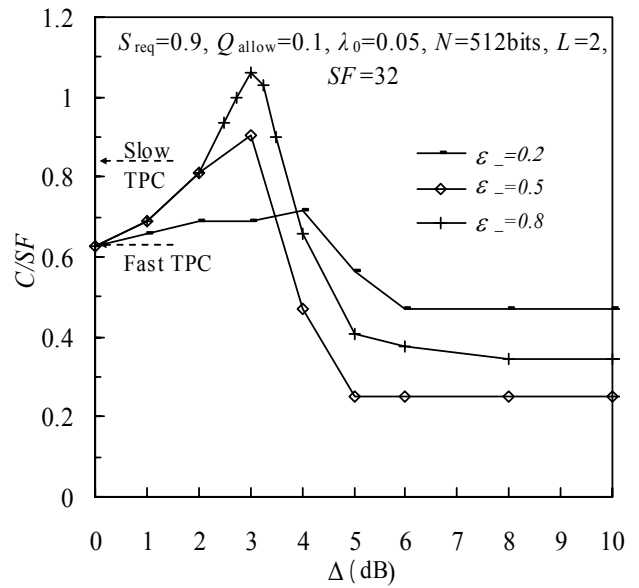


図 3 ゆらぎ 対リンク容量

図 4 に  $\Delta=3$ dB,  $SF=32$  であるときのゆらぎ確率  $\epsilon_-$  対正規化リンク容量を示す。確率  $\epsilon_-$  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。 $\epsilon_-$  が 0.8 のときに正規化リンク容量が最大 ( $C/SF=1.03$ ) になり、低速 TPC のそれより大きくなる。

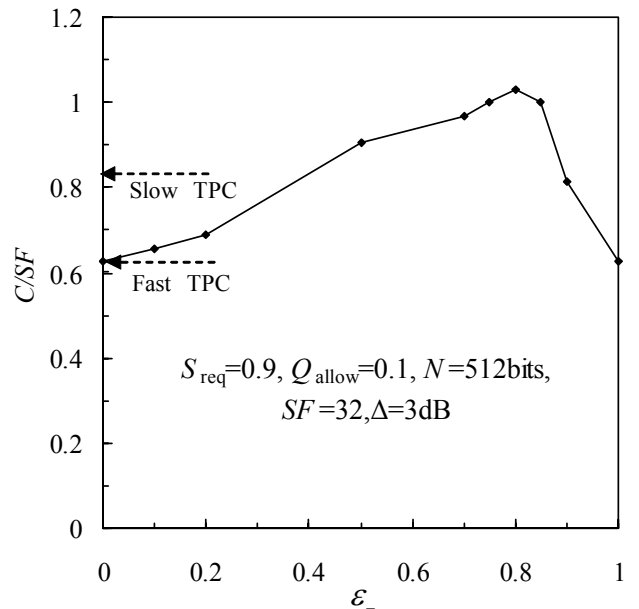


図 4 ゆらぎ確率  $\epsilon_-$  対リンク容量

### 5.2. 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．提案 TPC 法では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．

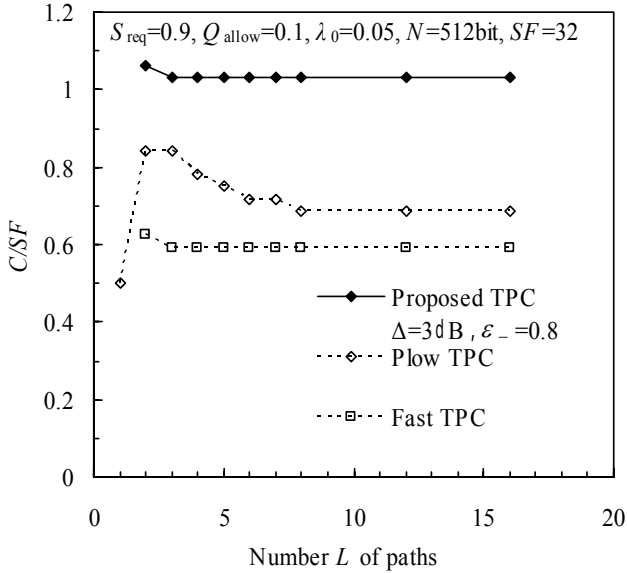


図 5 パス数対リンク容量

### 5.3. 拡散率 SF の影響

図 6 に拡散率対正規化リンク容量の特性を示す．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．拡散率が 4 以上になると提案 TPC 法のリンク容量が低速 TPC 場合よりも大きくなることが分かる．拡散率が 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．

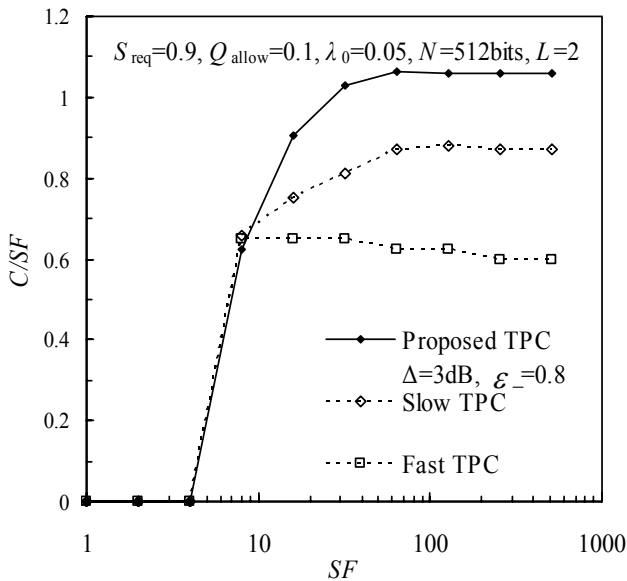


図 6 拡散率対リンク容量

## 6. 結び

受信電力ターゲット値にゆらぎを強制的に与える高速 TPC を提案した．スロットアロハを対象に，DS-CDMA 無線パケット通信の上りリンク容量を計算機シミュレーションにより求め，その効果を明らかにした．本論文で得られた結果をまとめると以下のようになる．

提案 TPC 法で得られるリンク容量は，低速 TPC で得られるリンク容量よりも大きくなる．これは提案 TPC では大きなキャプチャ効果が得られるような電力変動を強制的に与えることができるからである．例えば， $SF=32$  の場合，低速 TPC の最大となるリンク容量 ( $C/SF$ ) は 0.8 であるが，提案 TPC では 1.03 である．

低速 TPC ではリンク容量が伝搬路のパス数  $L$  に依存するが，提案 TPC のリンク容量は伝搬路のパス数  $L$  に殆ど依存しない．

提案 TPC の最大リンク容量はゆらぎ (dB) 及びゆらぎ確率  $\epsilon_-$  に依存する．例えば  $L=2$ ， $SF=32$  のとき  $\Delta=3\text{dB}$  及びゆらぎ確率  $\epsilon_-=0.8$  とすれば，リンク容量が最大となる．

## 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] J. C. Arnbak and W. van Blitterswijk, "Capacity of a slotted ALOHA in Rayleigh fading channels," IEEE J. Selected Areas Comm., Vol. SAC-5, pp. 261-299, Feb. 1987.
- [3] R. Prasad, "Performance analysis of mobile packet radio network in real channels with inhibit multiple access," IEE Proceedings-I, Vol. 138, No.5, pp. 458-464, Oct. 1991.
- [4] 王智森, 工藤栄亮, 安達文幸, "DS-CDMA パケット移動通信の上りリンク容量に及ぼす送信電力制御と Rake 受信の効果," 信学技報, SST2002-40, pp. 31-36, 2002 年 10 月.
- [5] J.G. Proakis, *Digital communications*, 3rd ed., McGraw-Hill, 1995.
- [6] D. K. Kim and F. Adachi, "Performance analysis of closed-loop link power control for packet transmission over DS-CDMA in a multipath fading environment" IEICE Trans. Commun., Vol. E84-B, pp. 2635-2643, Sept. 2001.