

# ランダム送信電力制御を適用したマルチセル DS-CDMA スロットッドアロハのスループット

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 6-6-05

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

**あらまし** 本論文では,ランダム TPC を用いる DS-CDMA スロットッド ALOHA のマルチセル環境下におけるスループット特性について検討している. シングルセルの場合と同様に, 真の packets 発生率が一定であるときのスループットは不連続な特性を有し, 再送 packets 発生メカニズムを考慮しないトラフィックモデルを用いて求めたシステムスループットが必ずしも得られるわけではないことを明らかにした. さらに, パスロス指数が小さくなるほど, またシャドウング標準偏差が大きくなるほど他セル干渉が大きくなるためシステムスループットが小さくなることを示した.

**キーワード** ランダム送信電力制御, スロットッドアロハ, DS-CDMA, スループット

## Throughput of Slotted ALOHA DS-CDMA with Random TPC in a Multi-cell Environment

ZhiSen WANG, 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: wang@mobile.ecei.tohoku.ac.jp, kudoh@mobile.ecei.tohoku.ac.jp, adachi@ecei.tohoku.ac.jp

**Abstract** In this paper, the theoretical analysis of the throughput of slotted ALOHA DS-CDMA with random TPC in a multi-cell environment is presented. It is found that for the given occurrence rate of original packets, the throughput performance has a discontinuous property and is not necessarily the same as that obtainable for the traffic model which does not take into account the packet retransmission mechanism. It is also found that the system throughput decreases as the path loss exponent becomes smaller and the shadowing standard deviation increases.

**Keywords** random transmit power control, slotted ALOHA, DS-CDMA, throughput

### 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提供するために packets 通信が主流になると予想される. 高速 packets 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, 現在サービスが提供されている. 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 packets 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 [2,3] ので, 有線系システムよりスループットが増大する [5]. 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 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 はシャドウイング変動のみを抑圧して, 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 が提案されている [6] ~ [10]. 筆者らは, ランダム TPC は高速 TPC や低速 TPC を用いた場合よりも, DS-CDMA システムのリンク容量を大きくできることを示した [4].

packets 通信では, リンク容量やスループットはシステム性能を示す重要なパラメータである. 筆者らは, DS-CDMA シングルセル環境におけるランダム TPC のスループットを理論解析により明らかにし, 真の packets 発生率が一定なトラフィックモデルを用いたときには, 再送 packets 発生メカニズムを考慮しないトラフィックモデルを用いて求めたスループットが必ずしも得られるわけではないことを明らかにした [12]. マルチセルシステムでは, 他セルからの干渉が発生してしまうので, シングルセルの場合に比べ, スループットが劣化する. また, 自セルからの干渉におけるパスロスとシャドウングロスの影響は TPC により抑圧されるが, 他セルからの干渉はこれらの影響を受ける. 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 のスループットを計算機シミュレーションにより求め, パスロスやシャ

ドウングの影響を明らかにする。

本論文は以下のように構成されている。第2章でランダム TPC を用いる DS-CDMA スロットッドアロハのシステムスループット及びユーザスループットを理論的に導出する。第3章でシミュレーションによりスループットを求め、パスロスとシャドウング標準偏差の影響を考察する。第4章はむすびである。

## 2. スループット

### 2.1 ランダム TPC と TDD システム

受信信号電力に基づく高速 TPC では、基地局での受信信号電力  $P_R$  が TPC ターゲット値  $P_{\text{target}}$  になるように移動局の瞬時送信電力  $P_T$  が制御される。一方、ランダム TPC では、図1に示すように、強制的に確率  $\epsilon_{\pm}$  ( $\epsilon_+ + \epsilon_- = 1$ ) で移動局の送信電力に  $\pm \Delta$  dB のゆらぎを与える。すなわち、基地局での受信電力は確率  $\epsilon_{\pm}$  で  $P_{\text{target}} \pm \Delta$  (dB) になるように制御される。

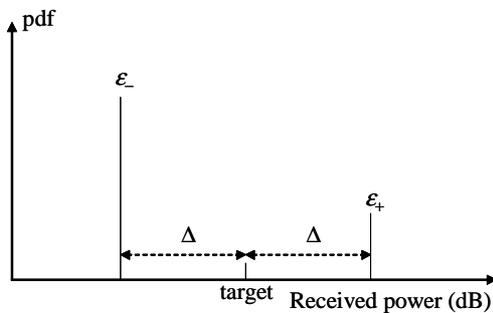


図1 ランダム TPC の受信電力分布

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、伝搬路損を計算することができる。そして、移動局は自律的に送信電力を決定できる。移動局は周辺の基地局パイロット信号を受信して、瞬時伝搬路損(パスロス、シャドウングロス及びフェージング)が一番小さい基地局を選択してその基地局にアクセスする。

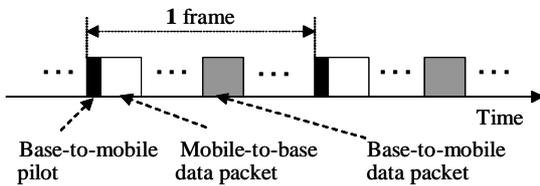


図2 TDD システムの送受信タイミング

### 2.2.再送パケットの発生メカニズムを考慮しないトラフィックモデルを用いる場合のシステムスループット

各ユーザがパケットをランダムに送信すると、衝突

しパケット誤りが発生する。パケット伝送では、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。1 スロット当りに発生する再送を含めた平均のパケット数はトラフィック  $G$  である。その中で正しく伝送されたパケット数がシステムスループット  $S$  である。平均パケット誤り率を  $p$  とすると、 $G$ 、 $S$  と  $p$  は次式の関係にある。

$$S = G(1-p) \quad (1)$$

図3に示すような19セルモデルを用い、中心のセルを考察の対象とする。ユーザは各セルの中に一様分布していると仮定する。各セルのアクティブユーザ数を  $K$  人、再送を含めたパケット発生率を  $\lambda$  とすると、中心セルにおける平均パケット誤り率  $p$  は次式より計算できる。

$$p = \sum_{k=0}^{19K-1} \binom{19K-1}{k} \lambda^k (1-\lambda)^{19K-1-k} p(k) \quad (2)$$

ここで、 $p(k)$  は  $k$  個の干渉パケットが衝突した時の平均パケット誤り率であり、 $\binom{19K-1}{k} = \frac{(19K-1)!}{k!(19K-1-k)!}$  は2項係数である。また、1セル当たりの  $G$  は次式で与えられる。

$$G = K\lambda \quad (3)$$

以上より、 $p(k)$  を求めることができれば、 $G$  と  $S$  の関係を求めることができる。 $p$  及び  $p(k)$  の求め方は、文献[11]に記載されている。

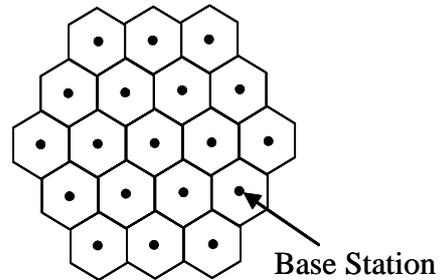


図3 19セルモデル

### 2.3. 真のパケット発生率を一定とするトラフィックモデルのスループットとリンク容量

各ユーザの真の(再送パケットを含めない)パケット発生率を一定とするトラフィックモデルを用いてリンク容量を求める。各ユーザの真のパケット発生率を  $\lambda_0$  とする。アクティブユーザ数が大きいほど、衝突によりパケット誤り率が大きくなり、再送も増加する。したがって、再送を含めたパケット発生率  $\lambda$  は真のパケット発生率  $\lambda_0$  とアクティブユーザ数  $K$  に依存するはずである。 $\lambda$  と  $\lambda_0$  は次式の関係にある。

$$\lambda = \frac{1}{1-p} \lambda_0 \quad (4)$$

式(2), (4)と文献[11], [4]より,  $K$  と  $\lambda_0$  が与えられたときの  $\lambda$  と  $p$  を求めることができ, さらに式(1),(3)を用いて真の packets 発生率が与えられたときのトラフィックとスループットの関係を求めることができる.

次に,  $K$  人のアクティブユーザが存在するときのユーザスループットを  $s(K)$  で表す,  $s(K)$  は次式で表される.

$$s(K) = 1 - p \quad (5)$$

所要ユーザスループット  $s_{req}$  が与えられたときのリンク容量  $C$  は次式で表される.

$$C = \arg \max_K \{s(K) \geq s_{req}\} \quad (6)$$

### 3. シミュレーション結果

表 1 にシミュレーション諸元を示す. ユーザは各セルの中に一様分布すると仮定する. 基地局は定期的にパイロット信号を送信する. ユーザは最も近い方から 19 セルの基地局からのパイロット信号を受信する. その中で瞬時伝搬路損が最も小さい基地局と通信する. また, 拡散率  $SF=32$ , ランダム TPC のゆらぎ確率  $\epsilon=0.8$  とした.

表 1 シミュレーション諸元

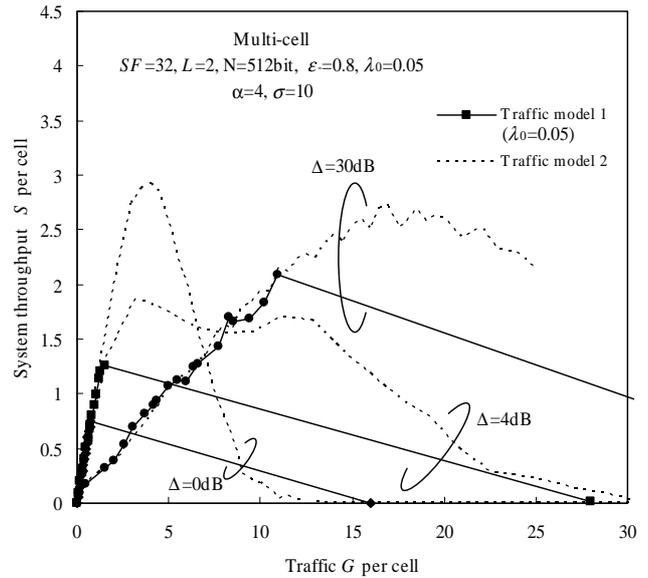
User distribution		Uniform
Propagation channel	Fading	Block Rayleigh
	Number of paths	$L=2$
Transmitter and receiver	Data modulation and demodulation	Coherent BPSK
	Spreading factor	$SF=32$
Packet	Length	$N=512$ bits
	Data packet generation probability	$\lambda_0=0.05$
Random TPC	Deviation probability	$\epsilon=0.8$
	Deviation	$\Delta=0-30$ dB
QoS	Required throughput	$S_{req}=0.9$
	Allowable outage probability	$Q_{allow}=0.1$

#### 3.1. $\Delta$ の影響

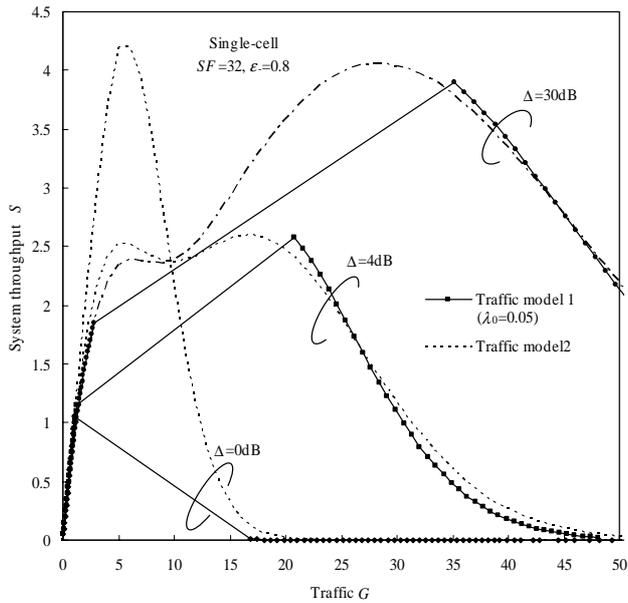
図 4 に, システムスループットとトラフィックの関係を示す. 真の packets 発生率を一定にしたときのトラフィックモデル (トラフィックモデル 1) で求めたスループットを実線でプロットしている. 再送パケットの発生メカニズムを考慮しないトラフィックモデル (トラフィックモデル 2) を用いるシステムスループット特性を点線でプロットしている. トラフィックモデル 1 で求めたスループットは, アクティブユーザ数

がある値以上になると衝突が急激に増えることにより再送が急増してトラフィックの急激な増加が生じる. このため, 不連続なシステムスループット特性になる.

リンク容量は所要のユーザスループットを満たす最大アクティブユーザ数である. 図 5 にトラフィックモデル 1 を用いたときのユーザスループット  $s(K)$  とアクティブユーザ数  $K$  の関係を示す. マルチセルの場合を実線で, 比較のためシングルセルの場合を点線でプロットしている. 所要のユーザスループット  $s_{req}$  が  $s_{req} = 0.9$  であるときの, マルチセルでのリンク容量  $C$  は,  $\Delta=0$  dB, 4 dB, 30 dB のときそれぞれ,  $C=15, 19, 1$  であり,  $\Delta=4$  dB のときにリンク容量が最大となる. 一方, 図 4 より, トラフィックモデル 2 の場合,  $\Delta=0$  dB のときにシステムスループットは最大になる. これは, 再送パケットが多くなると所要のユーザスループットを満たさなくなるので, 所要のユーザスループットを満たすという条件下では, トラフィックモデル 2 でのシステムスループットが最大となるようなトラフィック条件が生じなくなるからである. したがって, トラフィックモデル 2 でシステムスループットが最大となるシステムが必ずしもリンク容量も最大とは限らない.



(a) マルチセル



(b) シングルセル

図 4 トラフィックモデルの違いによるシステムスループット特性の違い

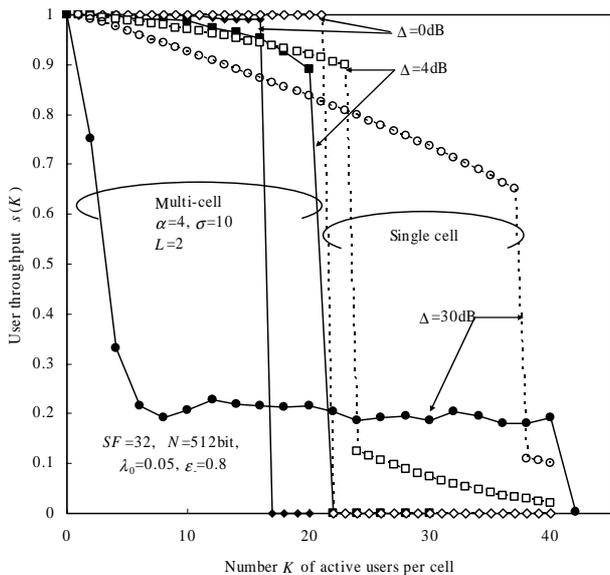


図 5 トラフィックモデル 1 を用いたときのアクティブユーザ数対ユーザースループット特性

### 3.3. シャドウング標準偏差 $\sigma$ の影響

図 6 にシャドウング標準偏差 $\sigma$ の影響を示す。 $\sigma$ が大きいほど、システムスループットが小さくなる。 $\sigma$ が大きいほど各基地局と移動局と間の伝搬ロスの分散が大きくなるので、基地局を選択するときには得られるダイバーシチ効果が大きくなるものの、他セルからの干渉電力が大きくなってしまいうので、スループットが劣

化してしまう。

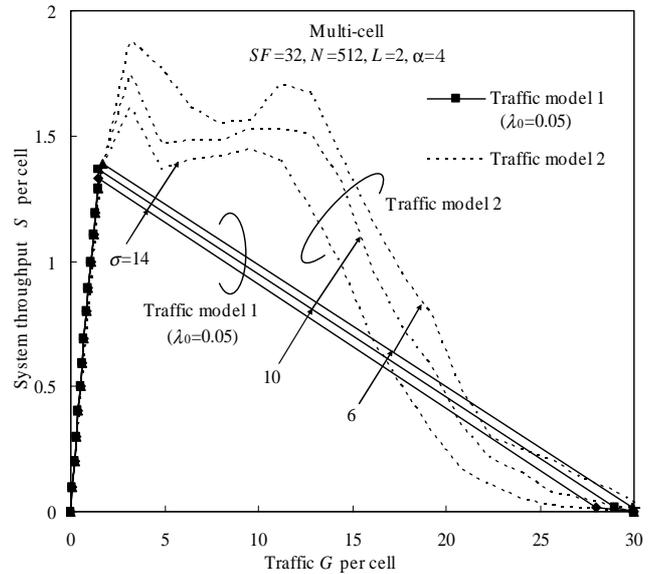


図 6 シャドウング標準偏差の影響

### 3.4. パスロス指数 $\alpha$ の影響

パスロス指数 $\alpha$ の影響を図 7 に示す。 $\alpha$ が小さいほど、他セルからの干渉が大きくなるため、スループットが小さくなる。図 4 と比較すると、真の packets 発生率を一定としたトラフィックモデル 1 の場合、パケット再送が急増しない領域ではシングルセルのときとほぼ同等のシステムスループットが得られていることがわかる。

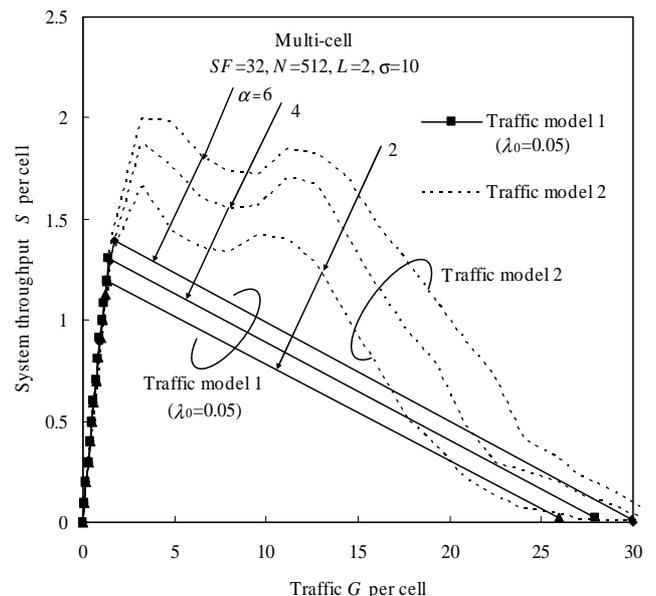


図 7 パスロス指数の影響

#### 4. むすび

ランダム TPC を適用したときのマルチセル環境における DS-CDMA/TDD スロット付アロハのシステムスループットとユーザスループットをシミュレーションにより求めた。その結果、以下のことを明らかにした。

シングルセルの場合と同様に、真の packets 発生率が一定であるときのスループットは不連続な特性を有し、packets 再送メカニズムを考慮しないトラフィックモデルを用いて求めたシステムスループットが最大となるトラフィック条件が、真の packets 発生率を一定としたトラフィックモデルを用いた場合には得られるとは限らない。

パスロス指数  $\alpha$  が小さくなるほど、またシャドウング標準偏差  $\sigma$  が大きいほど、他セルからの干渉電力が大きくなるため、スループットが劣化する。

- [12] 王智森, 工藤栄亮, 安達文幸, “ランダム送信電力制御を適用したシングルセル DS-CDMA スロット付アロハに於けるスループットとリンク容量,” 信学技報, RCS2004-121, pp. 7-11, 2004 年 8 月。

#### 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] 原, 森川, “ランダム電力選択法を用いたスロット付きアロハ方式に関する性能解析,” 信学技報, RCS96-98, pp.85-91, Oct.1996.
- [6] 加藤, 鈴木, “ランダムマルチレベル送信と最小電力アクセスによる移動通信方式のスループット改善,” 信学技報, RCS98-248, pp. 93-98, Feb. 1999.
- [7] C. C. Lee, “Random signal level for channel access in packet broadcast networks,” IEEE Jour. Select. Areas Commun., vol. SAC-5, pp. 1026-1034, July 1987.
- [8] Y. Hara, and H. Morikawa, “Analysis of slotted ALOHA networks with random power level selection,” Technical report of IEICE, RCS96-98, pp. 85-91, Oct. 1996.
- [9] J. J. Metzner, “On improving utilization in networks,” IEEE Trans. Commun., Vol. COM-24, pp. 447-448, April 1976.
- [10] I. Cidon, H. Kodesh, and M. Sidi “Erasure, capture, and random power level selection in multiple-access system,” IEEE Trans. Commun., Vol. COM-36, pp. 263-271, March 1988.
- [11] Z. Wang, E. Kudoh, and F. Adachi, “Application of random transmit power control to DS-CDMA/TDD packet mobile radio,” IEICE Trans. Commun., vol. E87-B, No.10, pp.3144-3149, Oct. 2004.