

帯域分割とランダム TPC を併用した DS-CDMA スロットッドアロハの リンク容量とスループット

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 DS-CDMA では、同一周波数帯域を全てのユーザが全てのセルで共有できるが、隣接セルから大きな干渉を受けてしまう。このためサイトダイバーシチ(あるいはソフトハンドオフ)を用いることが必要である。もし、与えられた周波数帯域を複数の周波数チャネルに分割し、各ユーザが適当な周波数チャネルを選択して送信することができれば、隣接セルからの大きな干渉を避けることができる。本論文では、帯域分割とランダム TPC を併用するときの DS-CDMA スロットッドアロハのスループット及びリンク容量を求め、帯域分割を用いることにより、スループットとリンク容量を増大できる可能性があることを明らかにした。

キーワード ALOHA, キャプチャ効果, ランダム送信電力制御, DS-CDMA

Link Capacity and Throughput of DS-CDMA Slotted ALOHA using Frequency-band Division and Random Transmit Power Control

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

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

Abstract In DS-CDMA, all users can share the same frequency band. Since large other-cell interference is produced, site diversity must be used. If the available frequency bandwidth is divided into several narrow frequency bands and each user transmits a signal using one of divided frequency bands, the interference from adjacent cells can be avoided. In this paper, we propose a DS-CDMA slotted ALOHA using frequency-band division and random transmit power control (TPC). Its link capacity and throughput are evaluated by computer simulation to show that the use of the frequency-band division and random TPC can increase the throughput and link capacity.

Keywords ALOHA, capture effect, Random transmit power control, DS-CDMA

1. まえがき

最近の移動通信では電子メールや WEB 閲覧などパケット系のトラフィックが増えてきている。そのため、無線パケット伝送に適した通信システムの構築が重要になっている。ところで、移動通信では、距離に依存した伝搬損失、大きな建造物などの遮蔽効果によるシャドウイング損失や近傍の散乱物で生ずるマルチパスフェージングによって、受信電力が複雑に変動する[1]。このような受信電力の変動は一般的には好ましくない現象として扱われ、これを克服するために送信電力制御 (TPC) や様々なダイバーシチ技術が検討されてきた。ところが、このような受信電力の変動は無線パケット通信にとって好ましい現象となっている。つまり、適当な受信電力変動があればキャプチャ効果が得られ

[2,3]、有線系システム(無線系の高速 TPC に当り)より大きなスループットが得られるからである。

高速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 2001 年に導入され、現在、約 30% のユーザが第 3 世代システムを利用している。第 3 世代システムでは DS-CDMA 無線技術が採用されている[4]。DS-CDMA では、異なる遅延時間を持つ伝搬路を経由して受信された信号を分離し、それらをコヒーレント合成する Rake 合成によって、マルチパスフェージングによる瞬時受信電力の変動を抑圧している。それでも受信電力変動が残留するので、フェージングの影響を解決するために TPC を用いている。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。一方、シャドウイング問題のみを解

決する低速 TPC では、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、高速 TPC よりもリンク容量を大きくできる[5]。キャプチャ効果が期待できるような適度な受信電力変動をフェージングに期待するのではなく、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 より 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[11]。

ところで、DS-CDMA セルラシステムでは同一周波数帯を全てのセルのユーザが共用する[4]。しかしながら、隣接セルから大きな干渉を受けるので、サイトダイバーシチあるいはソフトハンドオーバーの採用が必須である[12]。筆者らは、最近、与えられた周波数帯域を複数の周波数チャンネルに分割し、各ユーザが適当な周波数チャンネルを選択して送信すれば、隣接セルからの大きな干渉を避けることができ、リンク容量を増大できる可能性があることを文献[13]で指摘している。

本論文では、ランダム TPC と帯域分割を併用するときの DS-CDMA スロットッドアロハのスループット及びリンク容量を求めている。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 と帯域分割を用いる DS-CDMA スロットッドアロハについて述べ、第 3 章ではスループットとリンク容量を、第 4 章では計算機シミュレーション結果を述べている。第 5 章はむすびである。

2.ランダム TPC と帯域分割

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_{target} になるように移動局の瞬時送信電力 P_T を制御する。一方、ランダム TPC では、図 1 に示すように、強制的に確率 ϵ_{\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が確率 ϵ_{\pm} で $P_{target} \pm \Delta$ (dB) になるように制御する。

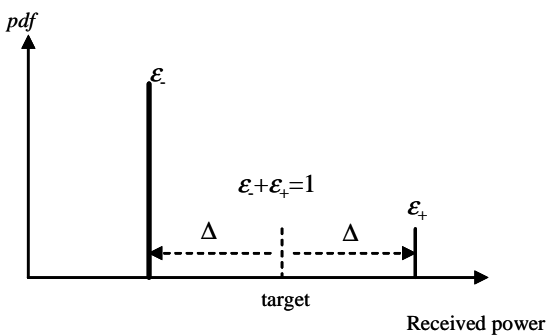


図 1. ランダム TPC における受信電力分布

隣接セルから大きな干渉を回避するために、本論文では図 2 に示すように、与えられた周波数帯域 W を N_c 個の周波数チャンネルに分割し、各ユーザはそのうちの 1 つの周波数チャンネルをランダムに選択して送信する。いま、帯域分割しないとき ($N_c=1$) の拡散率を SF 、分解可能なパス数を L とする。一様電力遅延プロファイルを仮定すると、 N_c 個に帯域分割したときの拡散率 SF'

および分解可能なパス数 L' は、それぞれ $SF' = SF / N_c$ および $L' = L / N_c$ になる。分割数が増えると 1 つの周波数チャンネルあたりに収容できるユーザ数が減少するので干渉が減少するものの、拡散率や分解可能なパス数が小さくなり、拡散による処理利得や Rake 合成によるパスダイバーシチ効果が小さくなってしまふ。従って、トレードオフの関係が発生するので、リンク容量やスループットを最大にする最適な帯域分割数が存在することが予想される。

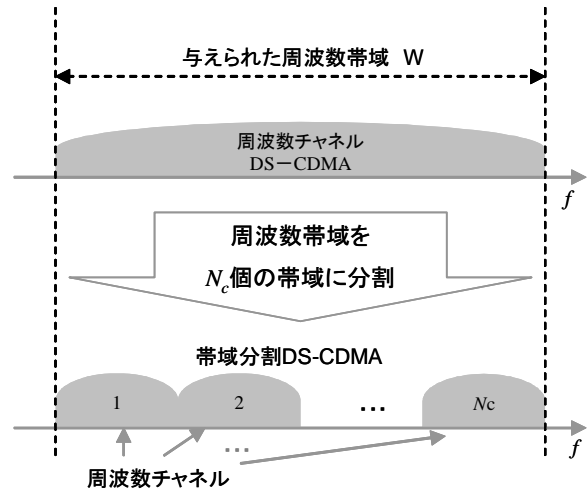


図 2 帯域分割

3.システムスループット、リンク容量及びパケット誤り率の数式表現

本論文では、図 3 に示すように 19 個の正六角形のセル配置を考える。スループットやリンク容量を求めるときの対象セルは 19 個のセルの中心セルである。

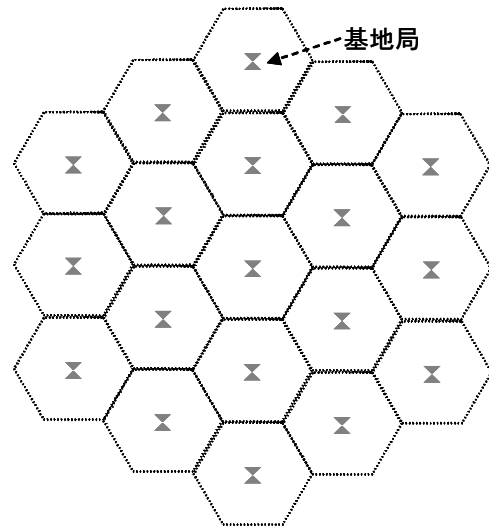


図 3 セル配置

3.1 システムスループット及びリンク容量

アクティブユーザ数を K 人として、再送を含めたパ

ケット発生率を λ とすると、トラフィック G は次式で表される。

$$G = K\lambda \quad (1)$$

システムスループット S 及びユーザスループット $s(K)$ は次式で表される。

$$S = G(1-p) \quad (2)$$

$$s(K) = 1-p \quad (3)$$

所要ユーザスループットを満たす最大のアクティブユーザ数をリンク容量 C と定義する。所要ユーザスループットが s_{req} であるときのリンク容量 C は次式で表される。

$$C = \arg \max_K \{s(K) \geq s_{req}\} \quad (4)$$

3.2 パケット誤り率

帯域分割数を N_c とすると、パケット誤り率 p は次式より計算できる。

$$p = \sum_{k=0}^{19K-1} \binom{19K-1}{k} \lambda^k (1-\lambda)^{K-1-k} \sum_{i=0}^k \binom{k}{i} \left(\frac{1}{N_c}\right)^i \left(1-\frac{1}{N_c}\right)^{k-i} p(i) \quad (5)$$

ここで、 $p(i)$ は i 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、 $\binom{a}{b} = \frac{a!}{b!(a-b)!}$ は 2 項係数である。 λ と p はパケット再送メカニズムと密接な関係がある。

アロハでは、各ユーザはパケットをランダムに送信するので、衝突により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。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。真のパケット 1 個を正しく送信するために送信されるパケットの総数は

$$\sum_{k=0}^{\infty} p^k = \frac{1}{1-p} \quad (6)$$

となる。したがって、再送を含めたパケット発生率 λ と真のパケット発生率 λ_0 は次式の関係にある。

$$\lambda = \frac{1}{1-p} \lambda_0 \quad (7)$$

したがって、 $p(i)$ を求めることができれば、式 (5) および (7) より λ_0 が与えられたときの λ が求まり、 K と G の関係及び K と $s(K)$ の関係を求めることができる。

BPSK 理想同期検波を適用したときの $p(i)$ は次式で与えられる。

$$p(i) = E \left[1 - \left(1 - \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \sqrt{\gamma_i} \right)^N \right] \quad (8)$$

ここで、 N はパケット長、 γ_i は信号電力対(干渉 + 雑音)

電力比 (SINR) である。 γ_i は確率変数であり、 $E[*]$ は γ_i に関する集合平均である。以下で γ_i を求める。

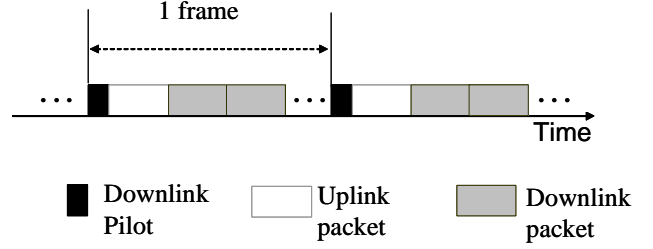


図 4 フレームの構成

図 4 に示すフレーム構成を考える。各基地局は周期的に一定の電力でパイロット信号を送信する。移動局は全ての基地局の全ての周波数チャネルの受信パイロット信号のうち瞬時電力が最大となる基地局を選択する。そして N_c 個の周波数チャネルの中から 1 つのチャネルをランダムに選択してパケットを送信するものと仮定する。理想的なランダム TPC、分解可能なパス数と等しい数のフィンガを持つ理想 Rake 合成を仮定する。

一般性を失うことなく、図 3 の中心セル 0 の移動局が周波数チャネル 0 で通信している場合について考える。移動局 q が通信する基地局とチャネルの番号を $j(q)$ と n で表すと、基地局 $j(q)$ で受信した移動局 q の Rake 合成後の瞬時信号電力 $P_{\text{Rake},q-j(q),n}$ は次式で表される。

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

ここで、 $j(q)$ は次式のように表される。

$$j(q) = \arg \max_j \left\{ r_{q-j}^{-\alpha} 10^{-\eta_{q-j}/10} \sum_{l=0}^{L-1} \left| \xi_{q-j,n}^{(l)} \right|^2 \right\} \quad (11)$$

ランダム TPC のゆらぎの大きさを dB とするとき、移動局 q の送信電力 \tilde{P}_q は次式で表わされる。

$$\tilde{P}_q = \frac{P_{\text{target}} 10^{\delta_q \Delta/10}}{r_{q-j(q)}^{-\alpha} 10^{-\eta_{q-j(q)}/10} \sum_{l=0}^{L-1} \left| \xi_{q-j(q),n}^{(l)} \right|^2} \quad (12)$$

ここで、 $\delta_q (= 1 \text{ or } -1)$ はゆらぎの状態を表す係数であり、 $\delta_q = +1$ のときには送信電力を dB 上げ、 $\delta_q = -1$ のときには送信電力を dB 下げる。また、 $P(\delta_q = \pm 1) = \varepsilon_{\pm}$ である。一般性を失うことなく、スループットの測定対象を移動局 $q=0$ とする。 i 個の干渉パケットが衝突しているときの SINR γ_i は次式で表される。

$\gamma_i =$

$$2SF \left(\sum_{l=0}^{L-1} \left| \xi_{0_{-0}(0),0}^{(l)} \right|^2 \right)^2 10^{\delta_0 \Delta / 10}$$

$$\left[\frac{1}{(T_b P_{\text{target}} / N_0)} \sum_{j=0}^{L-1} \left| \xi_{0_{-0}(0),0}^{(j)} \right|^2 + \sum_{m=0}^{L-1} \sum_{l=0, l \neq m}^{L-1} \left| \xi_{0_{-0}(0),0}^{(l)} \right|^2 \left| \xi_{0_{-0}(0),0}^{(m)} \right|^2 10^{\delta_0 \Delta / 10} \right. \\ \left. + \left(\sum_{l=0}^{L-1} \left| \xi_{0_{-0}(0),0}^{(l)} \right|^2 \right) \sum_{q=1}^{i-1} \left[\left(\frac{r_{q-0}}{r_{q-j(q)}} \right)^{-\alpha} 10^{-\frac{\eta_{q-0} - \eta_{q-j(q)}}{10}} 10^{\delta_q \Delta / 10} \right] \right] \\ \times \frac{\sum_{m=0}^{L-1} \sum_{l=0}^{L-1} \left| \xi_{q_{-0,0}}^{(l)} \right|^2 \left| \xi_{0_{-0}(0),0}^{(m)} \right|^2}{\left(\sum_{m=0}^{L-1} \left| \xi_{q_{-j(q),0}}^{(m)} \right|^2 \right)^2}$$

(14)

ここで、 T_b は 1 ビット長、 N_0 は背景雑音の片側電力スペクトル密度である。上式を式(8)に代入し、 r, η, ξ について平均することにより $p(i)$ を求めることができる。

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とスループットを求める。図 3 に示した 19 セル構成を考え、干渉制限リンクを仮定する。表 1 にシミュレーション諸元を示す。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、通信を行う基地局及び周波数チャネルを決定する。
- ステップ アクティブ移動局数が K のときのユーザ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、ユーザスループットが所要ユーザ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	$L=L' \times N_c=32$
Transmitter and receiver	Data modulation and demodulation	Coherent BPSK

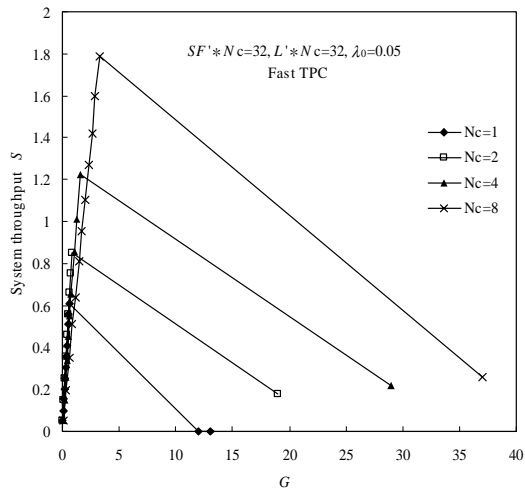
	Spreading factor	$SF' \times N_c=32$
Packet	Length	$N=512$ bits
	Data packet generation probability	$\lambda_0=0.05$
QoS	Required throughput	$S_{\text{req}}=0.9$
	Allowable outage probability	$Q_{\text{allow}}=0.1$

ランダム TPC で $\Delta=0\text{dB}$ とすると、従来の高速 TPC になる。帯域分割数 N_c をパラメータとして、図 5(a) に高速 TPC($\Delta=0\text{dB}$)を適用したときのトラフィック対システムスループット特性を、図 5(b)にアクティブユーザ数対ユーザスループット特性を示す。図 5(a)より、 N_c が大きいほど最大となるシステムスループットが大きくなること分かる。また、図 5(b)より $N_c=2, 4, 8$ のとき、それぞれユーザ数が $K=18, 25, 34$ となると急激にスループットが低下していること分かる。これは再送パケットが急増するからである。 N_c を大きくするほど、同一周波数チャネルを利用するユーザ数を少なくできるので、再送パケット数が急激に増大してしまうユーザ数を大きくできる。

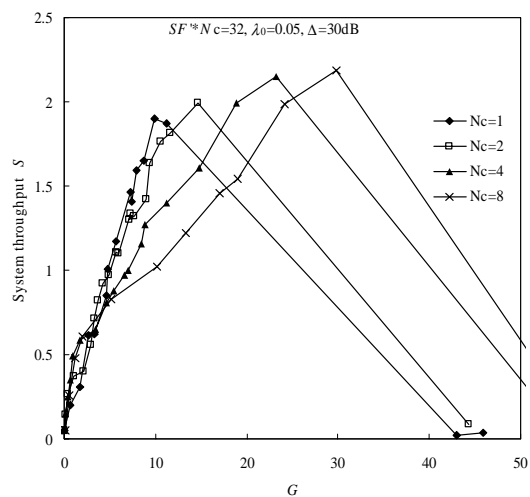
図 6 に、ランダム TPC を適用した場合の帯域分割数 N_c をパラメータとしたシステムスループットを示す。 $\Delta=4\text{dB}$ のとき、高速 TPC($\Delta=0\text{dB}$)の場合と同様に N_c を大きくするほどシステムスループットが大きくなる。これは N_c を大きくするほどパケット衝突確率を小さくできるので、急激な再送が発生しにくくなるからである。

図 7 にランダム TPC を適用した場合の帯域分割数 N_c をパラメータとしたユーザスループットを示す。 $\Delta=4\text{dB}$ のとき、高速 TPC($\Delta=0\text{dB}$)の場合と同様に N_c を大きくするほどシステムスループットが大きくなる。これは、 N_c を大きくするほどパケット衝突確率が小さくなるので、急激な再送が発生しにくくなるからである。しかし、 $\Delta=30\text{dB}$ の場合には、少ないユーザ数 K でもユーザスループットが著しく劣化してしまう。これは、受信電力差が大き過ぎるので、希望パケットの受信電力が小さいときには、他セルのユーザから大電力で送信されるパケットからの大きな干渉を受けるためである。

図 8 は帯域分割数 N_c とリンク容量 C の関係を示している。 $SF=32, L=32$ の場合では、リンク容量を最大にする最適な帯域分割数は $N_c=2$ であることが分かる。また $\Delta=4\text{dB}$ の場合に最大リンク容量が得られている。これは、帯域分割を併用することで衝突を避けつつ、 $\Delta=4\text{dB}$ のランダム TPC により適当なキャプチャ効果を得ることができるからである。

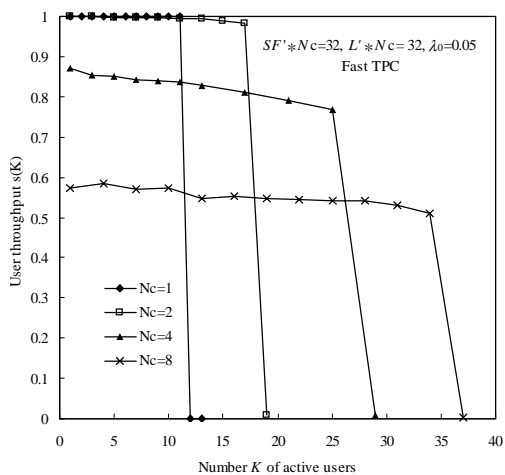


(a) システムスループット

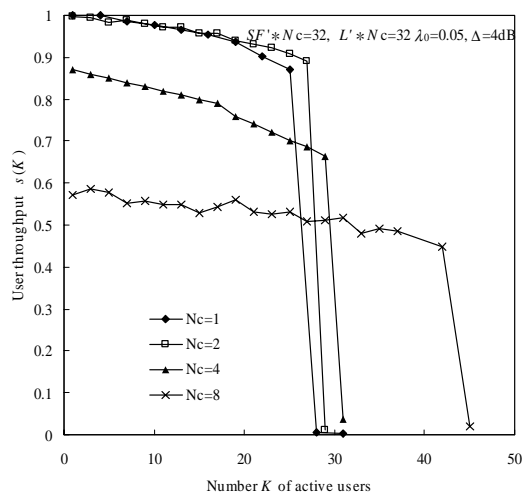


(b) $\Delta=30\text{dB}$

図 6 ランダム TPC を用いるときのシステムスループット

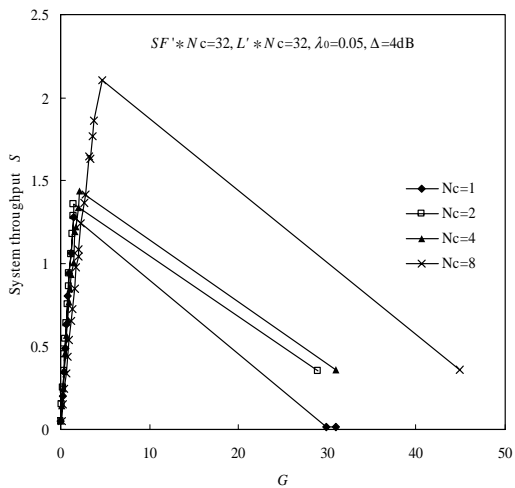


(b) ユーザスループット

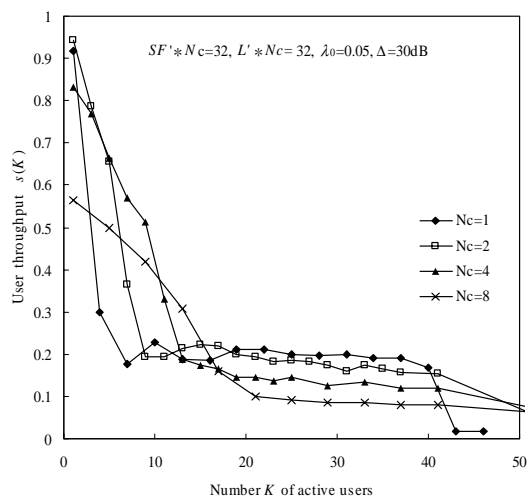


(a) $\Delta=4\text{dB}$

図 5 高速 TPC を用いるときのスループット



(a) $\Delta=4\text{dB}$



(b) $\Delta=30\text{dB}$

図 7 ランダム TPC を用いるときのユーザスループット

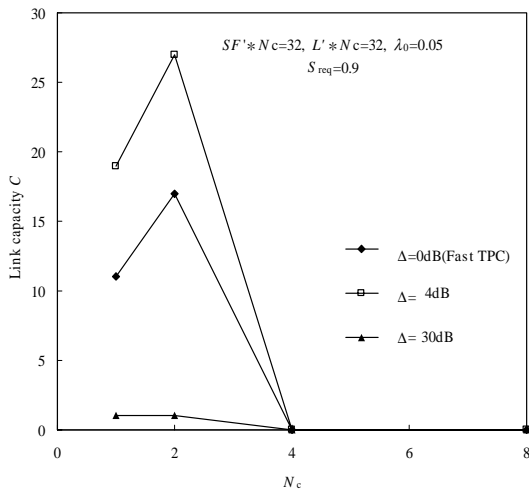


図 8 帯域分割数 N_c 対リンク容量 C

5. むすび

DS-CDMA スロットッドアロハでは、ランダム TPC を用いればキャプチャ効果が期待できるので高いスループットやリンク容量を得ることができる。隣接セルのユーザから送信されたパケットの衝突を避けることができれば、さらに高いスループットやリンク容量が期待できる。そこで、本論文では、帯域分割を適用して隣接セルからの干渉を避けつつ、ランダム TPC によりキャプチャ効果を得る DS-CDMA スロットッドアロハを提案し、そのスループット及びリンク容量を計算機シミュレーションにより求め、最適な帯域分割数が存在することを明らかにした。例えば、 $SF=32$ 、 $L=32$ 、 $\Delta \leq 4\text{dB}$ の場合、帯域分割数 $N_c=2$ のときに最大のリンク容量が得られ、帯域分割しないときの約 1.5 倍になることが分かった。また、 N_c を大きくするほどパケット衝突確率が小さくなるので、急激な再送が発生しにくくなり、最大となるシステムスループットは大きくなる。

他ユーザ干渉を避ける効果的な技術に基地局アンテナセクタ化や適応アンテナアレーがある。今後は、帯域分割とランダム TPC にアンテナアレーを加えたときのスループット及びリンク容量についても検討していく予定である。

参考文献

- [1] W. C. Jakes, Jr., ed., Microwave mobile communications, Wiley, New York, 1974.
 [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] 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.
 [5] 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.
 [6] 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.
 [7] 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.
 [8] 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.
 [9] 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.
 [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] 王, 工藤, 安達, "ランダム送信電力制御を適用したシングルセル DS-CDMA スロットッド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.
 [12] T. Inoue, S. Takaoka, and F. Adachi, "Frequency-domain equalization for MC-CDMA downlink site diversity and performance evaluation," IEICE Trans. Commun., vol.E88-B, No. 1, pp. 84-92, Jan. 2005.
 [13] 菅原, 工藤, 安達, "帯域分割とチャネル棲み分けを用いる DS-CDMA 上りリンクの周波数利用効率," 信学技報, RCS2004-52, pp.19-23, 2004年5月.