

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

菅原 卓[†] 工藤 栄亮[†] 安達 文幸[‡]

東北大学大学院 工学研究科 〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 05

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

あらまし DS-CDMA セルラ - 通信では、同一周波数帯域を全てのセルで再利用しているため、隣接無線セルから大きな干渉を受けてしまう。同一周波数帯域の全てのセルでの再利用を諦めて干渉を避けようとする、周波数再配置問題が発生してしまう。そこで本論文では、割当てられた広い周波数帯域を複数の帯域に分割し、大きな干渉を生じないように隣接セルでは同一周波数帯域をできるだけ再利用しないことを考える。複雑な周波数再配置問題を回避するためにチャネル棲み分け法を適用する。そのときのりリンク容量を計算機シミュレーションにより求め、帯域分割とチャネル棲み分け法を用いればリンク容量を増加できる可能性があることを示す。

キーワード 帯域分割, DS-CDMA 上りリンク, チャネル割り当て, チャネル棲み分け

Frequency Reuse Efficiency of A DS-CDMA Cellular System Using Band Division and Channel Segregation

Suguru SUGAWARA[†] Eisuke KUDOH[†] and Fumiyuki ADACHI[‡]

Dept. Graduate School of Engineering, Tohoku University 05 Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai, Miyagi, 980-8579 Japan

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

Abstract In DS-CDMA cellular communications systems, the single frequency reuse is utilized and hence large co-channel interference is received from other cells. If the single frequency reuse is not utilized to reduce the other-cell interference, we will face the frequency allocation problem, similar to FDMA systems. In this paper, we divide the available wide frequency band into several narrow frequency bands and try to assign the different frequency bands to adjacent cells so as to avoid the large other cell interference. For the assignment of the frequency bands, we propose to apply the channel segregation algorithm. We evaluate the link capacity by computer simulation to show that the link capacity can be increased by using band division and channel segregation algorithm.

Keyword Band division, DS-CDMA uplink, Channel assignment, Channel segregation

1. はじめに

次世代の移動無線通信システムでは、より高速で高品質な信号伝送およびリンク容量の大容量化が求められている[1]。しかし、移動通信で利用できる周波数帯域幅には限りがあり、周波数の有効利用は重要な課題である。周波数分割マルチアクセス(FDMA)を用いるセルラ移動通信における周波数の有効利用技術として、同一周波数帯域を干渉が無視できるように離れた無線セルで再利用する、周波数繰り返しがある[2]、[3]。周波数繰り返しでは複雑な周波数再配置問題が発生する。一方、直接拡散符号分割マルチアクセス(DS-CDMA)[4]を用いるセルラ移動通信では、逆拡散によって隣接セルからの干渉を低減できることから全てのセルで同一周波数帯域を再利用できる。このため、FDMA方式で課題であった複雑な周波数再配置問題を避けることができる。また、低速から高速レートのデータ伝送を柔軟に多重できることや Rake 受信によってマルチパスフェージングの影響を軽減して優れた伝送特性を得ることができるという利点がある。第3世代セルラ - 方式では 5MHz の広帯域 DS-CDMA[5]が用いられている。

DS-CDMA では全てのセルで同一周波数帯域を再利

用できるものの、隣接セルから大きな干渉を受けてしまう。もし、割当てられた周波数帯域を複数の帯域に分割し、隣接セルではできるだけ同一の帯域を利用しないようにすれば、DS-CDMA の利点を生かしながら隣接セル干渉を避けることができるのでリンク容量を増加させることができると考えられる。そこで本論文では、帯域分割を適用し、さらに複雑な周波数再配置問題を回避するためにチャネル棲み分け法[6]を適用する DS-CDMA を提案し、そのりリンク容量を明らかにする。

本論文は以下のような構成になっている。第2章では帯域分割とチャネル棲み分けを用いる DS-CDMA について述べる。第3章で、りリンク容量を計算機シミュレーションで求める。第4章はむすびである。

2. 帯域分割とチャネル棲み分けを用いる DS-CDMA セルラ - システム

2.1. 帯域分割

全てのセルで同一周波数帯域を用いる DS-CDMA セルラ方式では、隣接セルから大きな干渉を受けてしま

う．そこで，図 1 に示すように割当てられた周波数帯域を K 個の周波数チャンネルに分割することを考える．拡散符号を用いることで複数のユーザが同一周波数チャンネルを共有できる．そして， K 個に分割した全ての周波数チャンネルを全てのセルで再利用可能にするが，チャンネル棲み分け法[6]を適用して隣接セルではできるだけ同一の周波数チャンネルを再利用しないようにする．

K を大きくするにつれ，隣接セルに同一周波数チャンネルを割当てないようにできるから干渉が減少し，リンク容量が増加する．しかし，各周波数チャンネルの帯域幅が狭くなるため分解可能なパス数が減少するから，Rake 受信合成によるパスダイバーシチ効果が減少し， K を大きくし過ぎるとリンク容量は減少する．このことは，帯域分割したときのリンク容量は伝搬路のパス数に大きく依存することを示唆している．

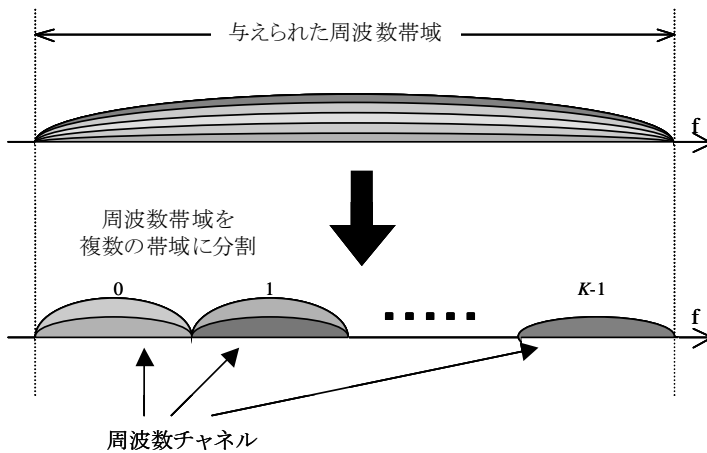


図 1 帯域分割

2.2. チャンネル棲み分け法

チャンネル棲み分け法は，各チャンネルの信号対干渉+雑音電力比(SINR)を測定して各基地局が干渉を学習し，互いに干渉の少ないチャンネルを割当てる[6]もので，最適な再利用パターンが自動的に生成される(図 4 を参照)．ここで，所要 SINR とは『所要の通信品質を確保するために必要な SINR』である．各基地局は，図 3 に示す全チャンネルの優先度を表した表を持ち，干渉を学習して優先度表を更新する．優先度表はどのチャンネルを優先的に使うかを表した表であり，チャンネルが使用された回数が増えるほどそのチャンネルの優先度が高くなる．チャンネル棲み分けを用いると，ある基地局では特定のチャンネルが頻繁に使われるようになり，隣接の基地局では別のチャンネルが頻繁に使われるようになる．また，干渉の影響が少ない離れた基地局では同一周波数チャンネルが使われるようになる．一方，固定チャンネル割り当てでは，干渉が発生しないような繰り返しパターンを予め決定してチャンネルを配置するため複雑な周波数再配置問題が発生する．

図 2 にチャンネル棲み分け法の基本アルゴリズムをフローチャートで示す．通信要求があると，基地局は優先度表を参照し，優先度が最も高いチャンネルの SINR を測定する．優先度を以下のように更新する．基地局はチャンネル n について優先度 $P(n)$ 及びチャンネルセン

回数 $N(n)$ の情報を持つ．チャンネルの優先度を上げる場合には

$$\begin{cases} P(n) := (P(n) \cdot N(n) + 1) / (N(n) + 1) \\ N(n) := N(n) + 1 \end{cases} \quad (1)$$

チャンネルの優先度を下げる場合には

$$\begin{cases} P(n) := P(n) \cdot N(n) / (N(n) + 1) \\ N(n) := N(n) + 1 \end{cases} \quad (2)$$

とする[6]．ただし，演算子「:=」は代入操作を表す．測定した SINR が所要 SINR 以上の場合はそのチャンネルを割り当て，そのチャンネルの優先度を高くする．測定した SINR が所要 SINR 未満の場合はそのチャンネルの優先度を下げ，次に優先度の高いチャンネルの SINR を測定する．同様な操作を繰り返し，全てのチャンネルが所要 SINR を満たさなければ呼損となる．これを全ての基地局が自律的に行うことで利用するチャンネルの棲み分けが行われる．

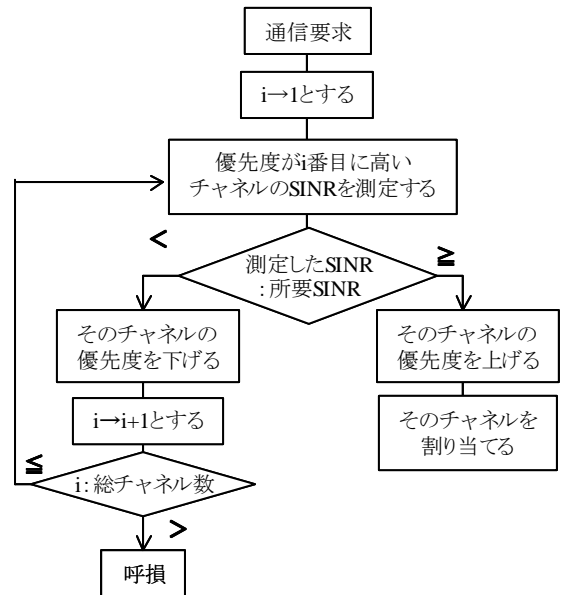


図 2 チャンネル棲み分け法の基本アルゴリズム

n	$P(n)$
0	0.453
1	0.574
2	0.319
...	...
K-1	0.342

図 3 優先度表

2.3. 所要 SINR

広帯域伝搬路は、遅延時間の異なる複数のパスから構成される周波数選択性フェージングチャンネルである[3]。DS-CDMA 上りリンクでは、フェージングと遠近問題回避のため高速送信電力制御(TPC)が必要となる。受信信号電力測定に基づく高速 TPC を仮定し、以下の条件の下で所要 BER を確保するための所要 SINR を求める。

- (1) $K=1$ のときの DS-CDMA の拡散率を G とする。また、データ変調および拡散変調には QPSK 変調を用いるものとする。
- (2) $K=1$ のときの伝搬路は、 L 個の独立パスで一様電力遅延プロファイルを有する周波数選択性レイリ-フェージングで特徴付けられるとする。
- (3) 帯域分割数が K のときの分解可能なパス数 L_{eq} を $L_{eq}=L/K$ 、拡散率を $SF=G/K$ とする。
- (4) L_{eq} フィンガを用いる Rake 合成を用いる。

基地局 j' と通信している移動局 $i(j')$ から送信された信号の基地局 j での瞬時受信信号電力対雑音電力比 $(S/N)_{i(j') \rightarrow j}$ は次式のように表せる[7]。

$$(S/N)_{i(j') \rightarrow j} = (P_t/N)_{i(j')} \cdot r_{i(j') \rightarrow j}^{-\alpha} \cdot 10^{-\eta_{i(j') \rightarrow j}/10} \cdot \sum_{l=0}^{L_{eq}-1} |\xi_{i(j') \rightarrow j}(l)|^2 \quad (3)$$

ここで、 $(P_t/N)_{i(j')}$ は移動局 $i(j')$ の送信電力、 $r_{i(j') \rightarrow j}$ は移動局 $i(j')$ と基地局 j との距離、 $\eta_{i(j') \rightarrow j}$ は標準偏差 σ dB の対数正規分布に従うシャドウイング損失、 $\xi_{i(j') \rightarrow j}(l)$ はパス l の複素パス利得である ($l=0 \sim L_{eq}-1$)。TPC 目標値を $(S/N)_{target}$ で表すと、送信電力 $(P_t/N)_{i(j')}$ は次式のようになる。

$$(P_t/N)_{i(j')} = (S/N)_{target} \cdot r_{i(j') \rightarrow j}^{\alpha} \cdot 10^{\eta_{i(j') \rightarrow j}/10} \cdot \left(\sum_{l=0}^{L_{eq}-1} |\xi_{i(j') \rightarrow j}(l)|^2 \right)^{-1} \quad (4)$$

理想的な最大比合成 Rake 受信を仮定すると、Rake 合成後の SINR λ は次式で表せる。

$$\lambda = \frac{(S/N)_{i(j') \rightarrow j}}{1 + \frac{1}{SF} E[(I/N)_j]} \quad (5)$$

ここで、 $E[\cdot]$ は標本平均操作を表す。 $(I/N)_j$ は基地局 j で受信した干渉電力対雑音電力比であり、次式で表される。

$$(I/N)_j = (U_j - 1)(S/N)_{target} + \sum_{j' \neq j} \sum_{i=0}^{U_{j'}-1} (P_t/N)_{i(j')} \cdot r_{i(j') \rightarrow j}^{-\alpha} \cdot 10^{-\eta_{i(j') \rightarrow j}/10} \cdot \sum_{l=0}^{L_{eq}-1} |\xi_{i(j') \rightarrow j}(l)|^2 \quad (6)$$

上式中の U_j は基地局 j と通信している移動局数である。伝搬路の電力遅延プロファイルが一様であるものと仮定する。このとき

$$E\left[|\xi_{i(j') \rightarrow j}(l)|^2\right] = \frac{1}{L_{eq}} \quad (7)$$

であり、文献[7]より

$$E\left[\left(\sum_{l=0}^{L_{eq}-1} |\xi_{i(j') \rightarrow j}(l)|^2\right)^{-1}\right] = \frac{L_{eq}}{L_{eq}-1} \quad (8)$$

である。ここで $\{\xi_{i(j') \rightarrow j}(l)\}$ と $\{\eta_{i(j') \rightarrow j}\}$ 、 $\{\eta_{i(j') \rightarrow j}\}$ と $\{\eta_{i(j') \rightarrow j'}\}$ は、それぞれ互いに独立であると仮定できる。したがって、式(5)は次式のようになる。

$$\lambda = \frac{(S/N)_{target}}{1 + \frac{(S/N)_{target}}{SF} \cdot \left[(U_j - 1) + \frac{L_{eq}}{L_{eq}-1} \cdot \sum_{j' \neq j} \sum_{i=0}^{U_{j'}-1} \left(\frac{r_{i(j') \rightarrow j'}}{r_{i(j') \rightarrow j}} \right)^{\alpha} \cdot 10^{\frac{\eta_{i(j') \rightarrow j'} - \eta_{i(j') \rightarrow j}}{10}} \right]} \quad (9)$$

干渉をガウス近似すると、QPSK 同期検波時の誤り率 (BER) P_b は次式で表せる[8]。

$$P_b = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \sqrt{\frac{\lambda}{2}} \quad (10)$$

本論文では、所要 BER を 10^{-2} とする。このときの所要平均 SINR λ_0 を式(10)より計算すると $\lambda_0=7.3$ dB となる。

λ_0 λ であるとき通信を開始できる。帯域分割すると分解可能なパス数が減少するため Rake 受信によるパスダイバーシチ効果が減少し、同一周波数チャンネルをより離れたセルで再利用しなければならなくなるので、リンク容量が減少する。一方、帯域分割することで干渉のない周波数チャンネルを増やせば、干渉を発生しない周波数チャンネルを隣接セルで利用できるようになるため、リンク容量を増加させることができる。このことは、リンク容量を最大とする帯域分割数が存在することを示唆している。

3. 計算機シミュレーション

3.1. シミュレーションモデル

シミュレーション諸元を表 2 に示す。本論文ではリンク容量を所要平均 SINR を満たす最大の呼量で表すものとする。以下のようなシミュレーションモデルを考える。

- (1) 37 セルからなる正六角形セル構成とする。
- (2) 呼の生起は平均 λ のポアソン分布に、保留時間は平均 h の指数分布に従う[9]。
- (3) 距離の $\alpha=3.5$ 乗に比例する伝搬損失 (dB) と、標準偏差 = 6 dB のシャドウイング損失 (dB) との和が最小の基地局を選択する。
- (4) チャンネル棲み分けによって周波数チャンネルの割り当てを行った後、通信を開始する。
- (5) 干渉制限型の上りリンクを仮定する。

表 2 シミュレーション諸元

トラフィック	呼の生起	ポアソン生起
	保留時間 h [s]	平均 $h=100$ [s] の指数分布
伝搬路	パスロス指数 α	3.5
	シャドウイング η の標準偏差 σ	6dB
	電力遅延プロファイル	一様電力プロファイル
	$K=1$ の場合のパス数 L	4, 8, 16, 32
変調方式	QPSK	
$K=1$ の場合の拡散率 G	128	
チャンネル割り当て	チャンネル棲み分け法	
分割数 K	1, 2, 4, ... ($K \leq L$)	

3.2. シミュレーション結果

3.2.1. 棲み分け状況

$K=1$ のときのパス数が $L=16$ で、帯域分割数が $K=4$ のときについて、4つの周波数チャンネル f_0, f_1, f_2, f_3 がどのように各セルで再利用されているか（つまりチャンネルの棲み分け状況）を図4に示す。使用頻度が多いほど色を濃く、少ないほど色が薄く示している。同一周波数チャンネルを隣接セルではできるだけ使用しないように棲み分けが形成されていることが分かる。

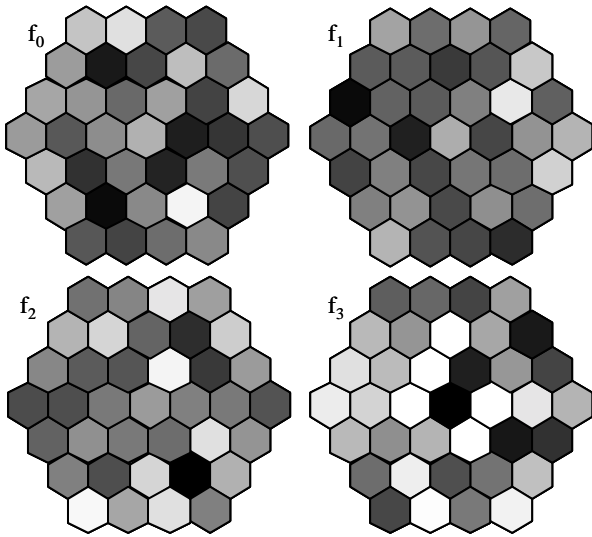
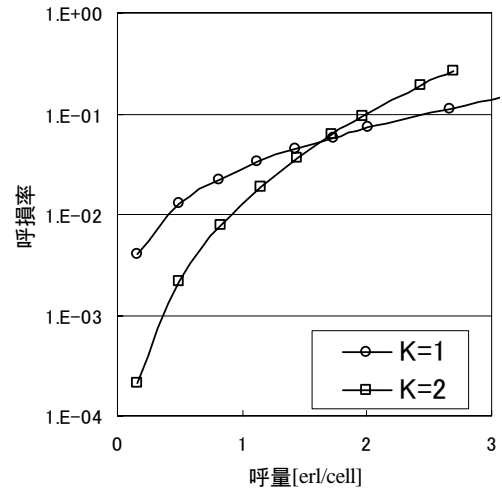


図 4 チャンネル棲み分けを用いたときのチャンネル利用頻度の分布。4周波数チャンネル($f_0 \sim f_3$)。

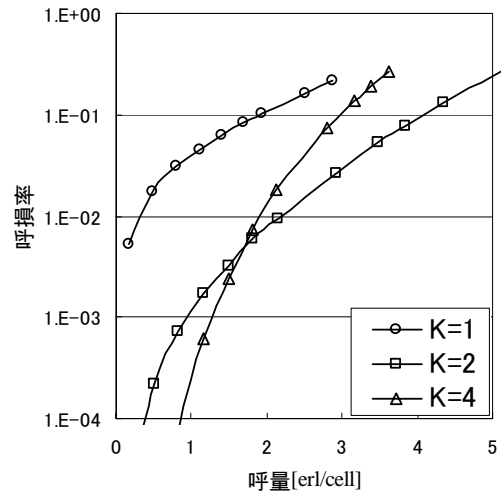
3.2.2. 呼量と呼損率

図5に呼量と呼損率の関係を示す。呼量は分割数 K に大きく依存することが分かる。 $L=8$ のとき、呼損率を 10^{-2} とするときの呼量は、 $K=1$ で約 0.4 erl/cell であるが、 $K=2$ とすると約 2.2 erl/cell と大幅に増加する。しかし、分割数を更に増やして $K=4$ とすると約 1.7 erl/cell に低下してしまう。同様のことが $L=4, 16$ および 32 についても言える。パス数 L をパラメータとして、呼損率 10^{-2} とするときの最大呼量を K の関数として図6にプロットした。 L が大きいほど最大呼量が増加している。これは、Rake 受信によるパスダイバーシチ効果によるものである。また、パス数 L が与えられたとき、呼量を最大とする K が存在することが分かる。つまり、 K を大きくすると呼量は増加するが、大きく

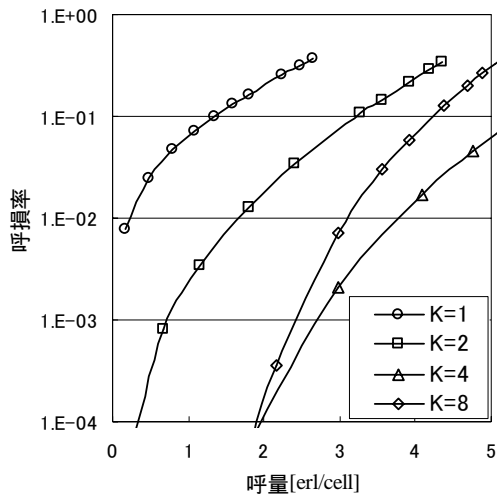
し過ぎると逆に呼量が減少してしまう。この理由は以下のように説明できる。 K を増加すると、同一周波数チャンネルを利用する干渉ユーザ数が減少して干渉が減少するため、呼量は増加する。しかし、 K をさらに増加すると、周波数チャンネルの帯域幅が狭くなるためパスダイバーシチ効果が減少し、呼量が減少してしまう。このため呼量を最大とする K が存在することになる。最大呼量を与える K は $L_{eq}=4$ とする K の値、すなわち $K=L/4$ となっている。



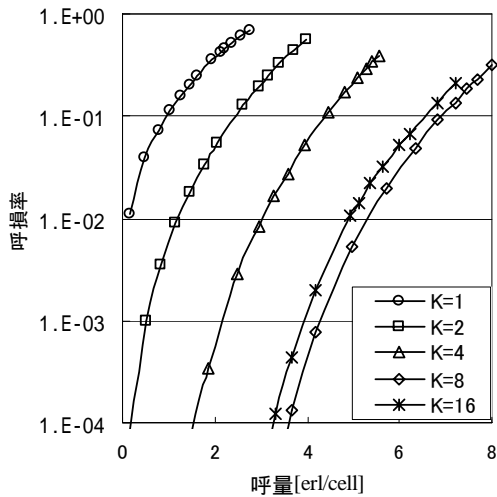
(a) $L=4$



(b) $L=8$



(c) $L=16$



(d) $L=32$

図5 呼量と呼損率の関係

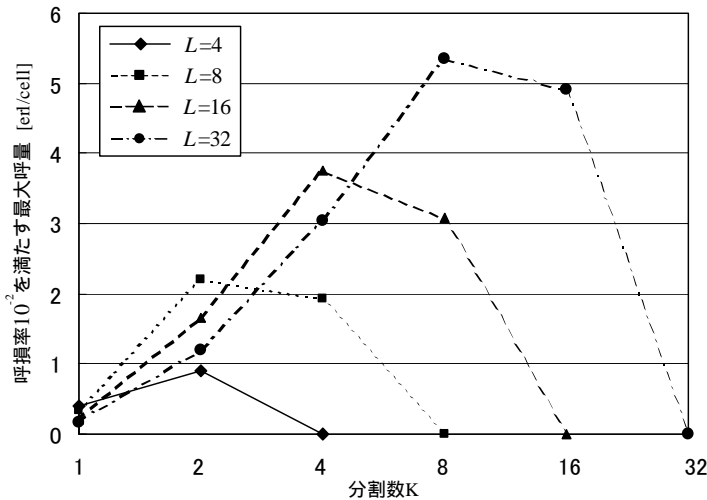


図6 呼損率 10^{-2} を満たす最大呼量

4. むすび

割当てられた周波数帯域を複数の帯域に分割し、チャンネル棲み分け法によってチャンネル割り当てを行う DS-CDMA セルラ方式について、計算機シミュレーションによりリンク容量を求めた。その結果、呼量を最大とする最適な分割数が存在することが分かった。帯域全てを一つの広帯域として用いることがリンク容量を必ずしも最大にするとは限らず、帯域分割によってリンク容量を大きくできる可能性があることを示した。今後はパロス指数、シャドウイングの標準偏差、拡散率 G 等のパラメータが帯域分割数 K とリンク容量に与える影響について明らかにする。

文 献

- [1] F. Adachi, "Wireless past and future - evolving mobile communications systems," IEICE Trans. Fundamentals, vol. E84-A, pp.55-60, Jan. 2001.
- [2] 奥村, 進士監修: 移動通信の基礎, 電子通信学会, 1976年.
- [3] W. C. Jakes, Jr., *Microwave mobile communications*, John Wiley, New York, 1974.
- [4] A. J. Viterbi, *CDMA: Principles of spread spectrum communications*, Addison-Wesley, 1995.
- [5] F. Adachi, M. Sawahashi, and H. Suda, "Wideband DS-CDMA for next generation mobile communications systems," IEEE Commun. Mag., vol. 36, pp. 56-69, Sept. 1998.
- [6] Y. Furuya and Y. Akaiwa, "Channel segregation, a distributed adaptive channel allocation scheme for mobile communication systems," IEICE Trans., vol. E 74, no.6, pp.1531-1537, June 1991.
- [7] D. K. Kim and F. Adachi, "Theoretical analysis of reverse link capacity for a SINR-based power-controlled cellular CDMA system in a multipath fading environment," IEEE Trans. Veh Technol., vol. 50, pp.452-464, March 2001.
- [8] J. Proakis, *Digital communication*. 3rd Ed., McGraw-Hill, New York.
- [9] 和達, 十河: キーポイント確率統計, 岩波書店, 1993.