

DS-CDMA 上りリンクにおける帯域分割と チャンネル棲み分けの適用効果

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 6-6-05

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

あらまし 筆者らはこれまでに、DS-CDMA セルラー通信において、隣接セルからの大きな干渉を避けるために、割り当てられた広い周波数帯域を複数の周波数に分割し、チャンネル棲み分けを用いて分割した周波数を配置することを提案してきた。一方、帯域分割を行わない従来の DS-CDMA セルラーシステムでは、すべてのセルで同一周波数チャンネルが使われるのでソフトハンドオフを適用できる。そこで本論文では、計算機シミュレーションにより、帯域分割を行わずにソフトハンドオフを用いる従来の DS-CDMA セルラーと提案している帯域分割 DS-CDMA セルラーのリンク容量を比較する。

キーワード 帯域分割, DS-CDMA 上りリンク, チャンネル割り当て, チャンネル棲み分け, ソフトハンドオフ

Effect of Band Division and Channel Segregation in A DS-CDMA Cellular System

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

Dept. Graduate School of Engineering, Tohoku University6-6-05 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 produced. Recently, authors proposed to divide the available wide frequency band into several narrow frequency bands and to assign the different frequency bands to adjacent cells using channel segregation algorithm, so as to avoid the large other cell interference. In conventional DS-CDMA cellular systems, the soft hand-off can be applied to increase the link capacity (this is only possible when the single frequency reuse is utilized). In this paper, we compare by computer simulation the link capacity of DS-CDMA using band division and channel segregation algorithm and that of conventional DS-CDMA using soft hand-off.

Keyword Band division, DS-CDMA uplink, Channel assignment, Channel segregation, Soft hand-off

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)を用いるセルラー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]。しかしながら、周波数繰り返しでは複雑な周波数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]を用いるセルラー移動通信では、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で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、さらにすべてのセルで同一周波数チャンネルが使われるのでソフトハンドオフを適用できるという利点がある。第3世代セルラー方式では 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。しかし、FDMA方式で課題であった周波数配置問題が生じてしまう。そこで筆者らはこれまでに、複雑な周波数配置問題を回避するためにチャンネル棲み分け法[6]を適用する帯域分割 DS-CDMA セルラー方式を提案し、その上りリンク容量を増加させる可能性を示した[7]。しかし、帯域分割を行うと、隣接セルで異なる周波数チャンネルを使用することになるため、従来の DS-CDMA セルラーシステムで用いられているソフトハンドオフを適用することはできない。そこで本論文では、帯域分割とチャンネル棲み分けを用いる場合と、帯域分割を行わずにソフトハンドオフを行う従来のセルラー方式の上りリンク容量を計算機シミュレーションにより比較する。

本論文は以下のような構成になっている。第2章では従来の DS-CDMA セルラーシステムと帯域分割 DS-CDMA セルラーシステムの概要について述べる。第3章では所要の信号対干渉+雑音電力比(SINR)を求め、第4章で上りリンク容量を計算機シミュレーション

ンにより求める．第5章はむすびである．

2. DS-CDMA セルラーシステム概要

2.1. 従来の DS-CDMA セルラーシステム

従来の DS-CDMA セルラーシステムでは，隣接セルでも同一の周波数を利用できるので，複数の基地局と同時に通信を行うソフトハンドオフを適用することで通信品質を向上させることが可能である．本論文では，複数の基地局で受信された信号の合成法として，瞬時受信信号電力が最大となる基地局のみを選択する瞬時選択合成を用いるソフトハンドオフを適用する DS-CDMA セルラーシステムの上りリンク容量を求め，帯域分割 DS-CDMA セルラーシステムの上りリンク容量と比較を行う．

2.2. チャンネル棲み分けを用いる帯域分割 DS-CDMA セルラーシステム

全てのセルで同一周波数帯域を用いる DS-CDMA セルラーシステムでは，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 $K(> 1)$ 個の周波数チャンネルに分割する．なお従来方式では，与えられた帯域すべてを一つの周波数チャンネルとして用いるため，周波数チャンネル数は $K=1$ である．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．各移動局は，平均受信信号電力が最大となる基地局を選択した後に，通信を行う周波数チャンネルを決定する．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周波数チャンネルを決定する[7]．

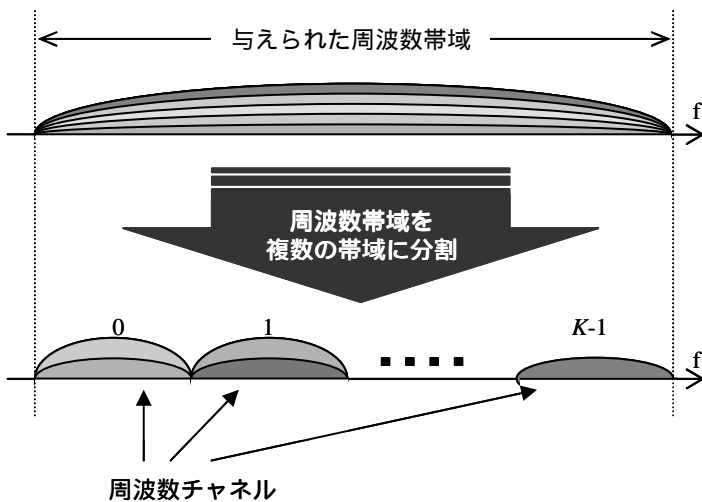


図1 帯域分割

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 $K(> 1)$ 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 $(S/N)_{i(j') \rightarrow j}$ は次式のように表される[8]．

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

ここで， $(P_i/N)_{i(j')}$ は移動局 $i(j')$ の送信電力対雑音電力比， $r_{i(j') \rightarrow j}$ 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 $(P_i/N)_{i(j')}$ は次式のようになる．

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

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．

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

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．これにより，(5)式は以下のように表せる．

$$\lambda = \frac{(S/N)_{target}}{1 + \frac{(S/N)_{target}}{SF} \cdot E \left[\frac{(U_j - 1) + \sum_{j' \neq j} \sum_{i=0}^{U_j-1} \left(\frac{r_{i(j') \rightarrow j'}}{r_{i(j') \rightarrow j}} \right)^\alpha}{10^{\frac{\eta_{i(j') \rightarrow j'} - \eta_{i(j') \rightarrow j}}{10}} \left(\sum_{l=0}^{L_{eq}-1} |\xi_{i(j') \rightarrow j}(l)|^2 \right)^{-1}} \right]} \quad (7)$$

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。ここで、

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

であり、文献[8]より

$$E \left[\left(\sum_{l=0}^{L_{eq}-1} |\xi_{i(j') \rightarrow j}(l)|^2 \right)^{-1} \right] = \frac{L_{eq}}{L_{eq} - 1} \quad (9)$$

である。ここで $\{\xi_{i(j') \rightarrow j}(l)\}$ と $\{\eta_{i(j') \rightarrow j}\}$ と $\{\eta_{i(j') \rightarrow j}\}$ は、それぞれ互いに独立であると仮定すると、式(5)は次式ようになる。

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

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[9]。

$$P_b = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \sqrt{\frac{\lambda}{2}} \quad (11)$$

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(11)式より計算すると $\lambda_0 = 7.3 \text{ dB}$ となる。 $\lambda = \lambda_0$ であるときに、通信を開始できる。

4. 計算機シミュレーション

4.1. シミュレーションモデル

シミュレーション諸元を表 1 に示す。本論文では、通信要求、通信開始、通信終了を時間軸上で忠実に模擬し、呼量と呼損率を求めている。一つの呼が通信を開始すると一定の時間通信を続けるものとし、ソフトハンドオフでは通信終了までに 100 回基地局を選択するものとする。例えば 100 秒の通信の場合には、1 秒毎にソフトハンドオフにより基地局を選択する。

本論文ではリンク容量を呼損率 10^{-2} を満たす最大呼量で定義する。呼量は(総通信時間)/(総システム時間)である。 $K=1$ の場合には、瞬時受信信号電力に基づいて通信を行う基地局選択を行い、通信中の平均 SINR を求め、所要平均 SINR を満たさない場合に呼損となる。 $K > 1$ の場合には、通信開始時に平均受信信号電力が最大となる基地局を選択し、所要平均 SINR を満たす平均 SINR となる周波数チャンネルが存在しない場合に呼損となる。

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 のポアソン分布に従い、呼の保留時間は一定とする(一般保留時間)。
- (3) 通信中、移動局における基地局からの平均受信信号電力は変わらないものとする。つまり、通信中は各基地局に対する距離の 乗に比例する伝搬損失 (dB) と標準偏差 のシャドウイング損失 (dB) は変わらない。
- (4) 干渉制限型の上りリンクを仮定する。
- (5a) $K=1$ の場合は、瞬時選択合成を用いるソフトハンドオフを適用する。伝搬損失とシャドウイング損失、フェージング損失 (dB) の和が最小の基地局を選択するものとし、通信中に 100 回基地局を選択する。通信可能な基地局は 37 全基地局とする。通信終了後に(7)式により通信中の平均 SINR を計算し、所要平均 SINR を満たさなければ呼損とする。
- (5b) 帯域分割を行う場合 ($K > 1$) は、伝搬損失とシャドウイング損失の和が最小の基地局を選択する。その後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い、通信開始時に(10)式により SINR を計算し、所要平均 SINR を満たす周波数チャンネルで通信を行う。全ての周波数チャンネルで所要平均 SINR を満たさなければ呼損とする。

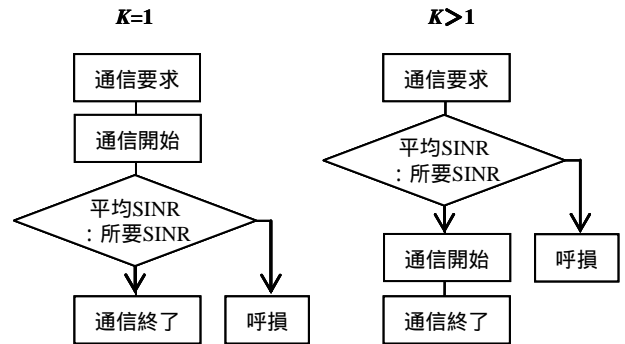


図 2 シミュレーションのフローチャート

表 1 シミュレーション諸元

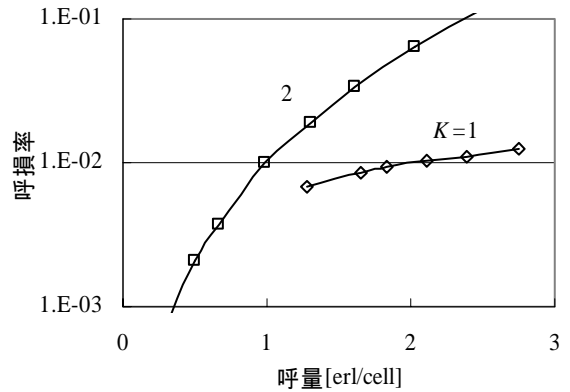
トラヒックモデル		ポアソン生起
伝搬路	パスロス指数 α	3.5
	シャドウイング η の標準偏差 σ	6dB
	電力遅延プロファイル	一様電力プロファイル
	$K=1$ の場合のパス数 L	4,8,16,32
変調方式		QPSK
$K=1$ の場合の拡散率 G		128
チャンネル割り当て		チャンネル棲み分け法
分割数 K		1,2,4...($K \leq L$)

4.2. シミュレーション結果

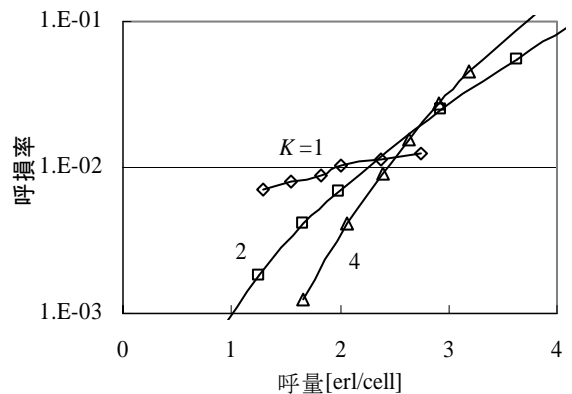
図 3 に呼量と呼損率の関係を示す。 $K=1$ の場合は従来の帯域分割を行わずにソフトハンドオフを行う DS-CDMA セルラーシステムであり、 $K > 1$ の場合は帯域分割セルラーシステムである。呼量は分割数 K とパス数 L に大きく依存することが分かる。パス数 L をパラメータとして、リンク容量を K の関数として図 4 にプロットした。呼損率 10^{-2} を満たす最大の呼量がリンク容量である。 $L=4$ のときのリンク容量は、従来の DS-CDMA セルラーシステム ($K=1$) で約 2.0erl/cell であるが、 $K=2$ とすると約 1.0erl/cell とおよそ半減している。帯域分割を行うことによりリンク容量が減少している。しかし、 $L=8$ のときは、 $K=1$ で約 2.0erl/cell、 $K=2$ で約 2.2erl/cell、 $K=4$ で約 2.4erl/cell と、分割数を増やすとリンク容量が増加している。同様に $L=16$ および 32 のときは、分割数を増やすとリンク容量が増加する傾向にあり、それぞれ最大で 2 倍および 3 倍のリンク容量が得られている。パス数 L が少ない場合 ($L=4$) には、帯域分割をせずにソフトハンドオフを用いるほう ($K=1$) がリンク容量が大きい。 L が多い場合 ($L=8, 16, 32$) には帯域分割を行ったほう ($K > 1$) がリンク容量を大きくできるのが分かる。この理由は以下のように説明できる。 $K=1$ の場合には、サイトダイバーシチ効果により周波数利用効率が高められている。 L が小さい場合に、帯域分割を行い K を大きくすると、周波数チャンネル数は増え干渉を与える周波数は減少するものの、各周波数チャンネルの帯域幅が狭くなりパスダイバーシチ効果が十分に得られなくなるため、リンク容量が減少することになる。従って、 L が小さい場合には従来の DS-CDMA セルラーシステムの方が有利である。一方、 L が大きい場合には、帯域分割を行い K を多くしても、 L が大きいためパスダイバーシチ効果が得られ、さらに同一の周波数チャンネルを利用する干渉ユーザ数が減少することによってリンク容量は増加する。ただし、 K を増加し過ぎると、パスダイバーシチ効果が十分に得られなくなるため、リンク容量は減少し、最適な分割数が存在する。従って、 L が大きい場合には帯域分割を行ったほうがリンク容量は増加すると言える。パス数 L によってリンク容量を最大とする分割数 K は異なり、最大のリンク容量を与える K は、 $L=4$ のときは従来の DS-CDMA セルラーシステム ($K=1$) のときであり、 $L=8, 16, 32$ の場合では $K=L/2$ 、または $K=L/4$ となっている。

次に、パス数 L をパラメータとして、リンク容量を分解可能なパス数 $L_{eq}=L/K$ の関数として図 5 にプロッ

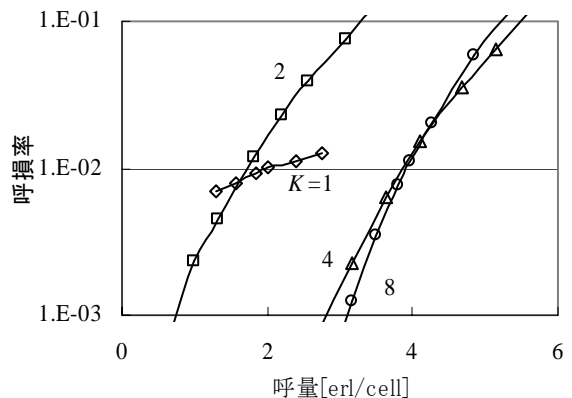
トした。全ての L で、 $L_{eq}=2$ または 4 の場合にリンク容量が最大になっていることが分かる。これは、 L_{eq} は 2~4 程度あれば十分なパスダイバーシチ効果が得られることを示している。つまり、もし L が与えられたとき、 $L_{eq}=L/K=4$ となるように K を設定すれば、パスダイバーシチ効果と周波数チャンネル数の増加による干渉の低減が期待でき、リンク容量を増加できると言える。



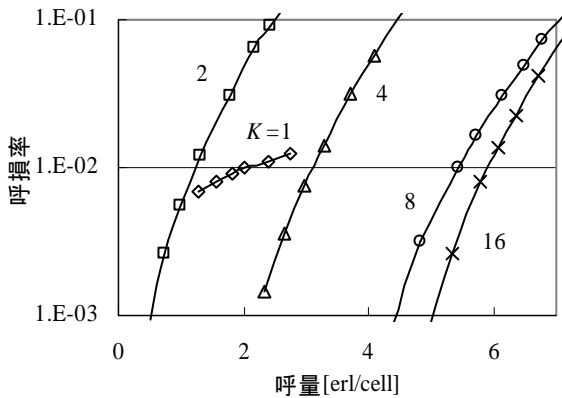
(a) $L=4$



(b) $L=8$



(c) $L=16$



(d) $L=32$

図3 呼量と呼損率の関係

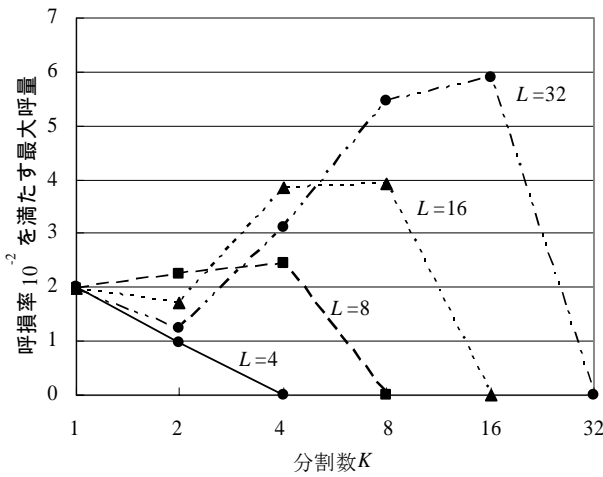


図4 分割数 K と呼損率 10^{-2} を満たす最大呼量

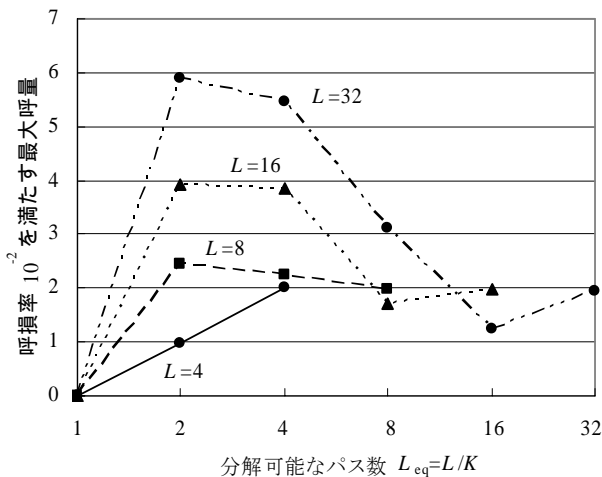


図5 分解可能なパス数 L_{eq} と呼損率 10^{-2} を満たす最大呼量

5. むすび

チャンネル棲み分け法を用いる帯域分割 DS-CDMA セルラーシステムと、帯域分割を行わずにソフトハンドオフを用いる従来の DS-CDMA 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た。その結果、パスダイバーシチ効果が十分に得られるだけのパス数が得られる程度に帯域分割すれば、従来のセルラーシステムよりリンク容量を増加できることがわかった。つまり、パス数が多い伝搬環境下では帯域分割しても十分なパスダイバーシチ効果が得られ、かつ隣接セル干渉を避けることができるため、帯域分割 DS-CDMA セルラーシステムのほうがリンク容量が大きいことを示した。

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] 菅原, 工藤, 安達, "帯域分割とチャン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.
- [8] 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.
- [9] J. Proakis, *Digital communication*. 3rd Ed., McGraw-Hill, New York.