

バーチャルセル無線ネットワークにおける 送信電力効率と周波数利用効率

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 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 05

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

あらまし 近年, 移動通信ではサービスの比重が音声通信からデータ通信へと移行しつつあり, これに伴い情報伝送速度の高速化が必要になっている. 伝送速度を高速化するにはピーク送信電力を増大させなければならず, これを緩和させるには, 極小セルにせざるを得ない. 本論文ではこのような極小セルシステムを実現するためのバーチャルセルラシステムを提案し, その送信電力効率と周波数利用効率を従来のセル構成に較べ著しく向上できることを示す.

キーワード バーチャルセル, 周波数繰り返し距離, 送信電力効率, 送信電力制御, ダイバーシチ

Transmit power and frequency efficiencies of virtual cellular mobile network

Eisuke KUDOH and Fumiyuki ADACHI

Electrical and Communication Engineering, Graduate School of Engineering, Tohoku University

05 Aza-Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai, 980-8579 Japan

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

Abstract: Recently, major services provided by mobile communications systems are shifting from voice conversations to data communications and there is a great demand to increase the data transmission rate. However, there will be an important problem to overcome; as data transmission rate becomes higher, the peak transmit power becomes larger. To decrease the peak transmit power while increasing the data transmission rate, the cell size should be made significantly small. However, in realizing nano- or even pico-cell network, the use of present cellular concept may not be optimal. In this paper, we propose a virtual cellular concept to realize pico-cell network and evaluate the transmit power and frequency efficiencies of the virtual cellular system, then compare them with that of the conventional cellular system.

Keyword: Virtual cellular, Frequency reuse distance, Transmit power efficiency, Transmit power control, Diversity

1. まえがき

第3世代の移動通信システムであるIMT-2000では最大2Mbit/sの伝送が可能である. しかしながら, インターネットの普及が促進され, リッチなコンテンツが広く流通するようになれば, やがてIMT-2000でさえ不十分となり, 100Mbit/s ~ 1Gbit/s程度のピーク伝送速度が要求されると思われる. 2010年ころに登場するであろう第4世代移動通信システムでは, このようなブロードバンド無線サービスの提供が期待される. しかし, 高速無線伝送を実現するにはピーク送信電力の増大という非常に困難な課題を克服しなければならない. 例えばセル半径を1kmとし, 8kbit/sのときのピーク送信電力が1Wであると仮定すると, 100Mbit/sのときには12.5kWものピーク送信電力が必要になってしまう. し

かしながら, このような送信電力は実際上許容できない. そこで, セル半径を小さくする必要がある. 例えば, 100Mbit/sの場合のピーク送信電力を1Wに抑えようとすると, 伝播損失が距離の3.5乗に比例すると仮定した場合, セル半径を15分の1にしなければならない. すなわち, 1kmであったセル半径を68mまでに小さくする必要がある. そこで, このような極小セルラシステムをいかに実現するかが, 重要な技術課題となる[1], [2]. 本論文ではこのような極小セルラシステムを構築するためのバーチャルセルラシステムを提案し, その平均送信電力の低減効果と周波数利用効率について考察する.

2. バーチャルセルラシステム

現在のセルラシステムのセルサイズを単純に極小セルとするだけでは、ハンドオーバや位置登録等の制御が膨大となってしまう。そこで、複数の極小セルをまとめて仮想セル（バーチャルセル）を構成することを提案する。各移動局はバーチャルセル内では従来のセルラシステムのセル内に存在しているかのようにふるまうことが可能となる。ここでは、極小セルを作る基地局を無線ポートと呼ぶ。図1にバーチャルセルラシステムと従来のセルラシステムを対比して示す。多数の無線ポートがバーチャルセルに分散配置されている。このようなバーチャルセルラシステムでは以下の特徴を有する。

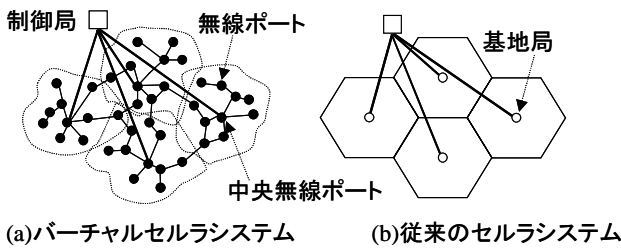


図1 バーチャルセルラシステムと従来のセルラシステム

バーチャルセルは多数の分散無線ポートにから構成される。無線ポートがどのバーチャルセルに所属するかは、ユーザごとあるいは上下リンクによって異なってもよい。したがって、ユーザごとあるいは上下リンクごとにバーチャルセルのサイズを変更させることも可能である。

セルサイズが小さくなるとハンドオーバや位置登録など制御トラヒックの増大が懸念されるが、バーチャルセルでは無線ポートのグループがあたかも1つの無線基地局として動作するので、そのような制御トラヒックの増大は生じない。

各無線ポートは他の無線ポートと中央無線ポートを経由して制御局と接続している。制御局と直接接続する必要がない。バーチャルセル内に無線ポートを自由に配置できる。

移動局から送信された信号は、バーチャルセル内の複数の無線ポートで受信できる。したがって、サイトダイバーシチ効果が得られるため、移動局の送信電力および無線ポートの送信電力を従来のセルラシステムより大幅に低減できる。

バーチャルセル内の無線ポートの総送信電力を低減できるので他のバーチャルセルに与える干渉電力が減少し、周波数利用効率を増大できる。この結果、OFDM, TDMA, FDMA 等のどのアクセス方式を用いても、同一無線周波数を隣接バーチャルセルで再利用できる可能性がある。場合によっては同一バーチャルセル内においても同一周波数を再利用できる可能性がある。

バーチャルセルは複数の無線ポートが協調して1つの基地局のように動作するので、無線ポート～中央無線

ポート間の通信方式やデータ転送経路選択アルゴリズムが重要な研究課題となる。無線ポート～中央無線ポート間を有線で接続させることも考えうるが、フレキシビリティの高いシステムにするためには、無線で接続させることが望ましい。各無線ポートを直接中央無線ポートと接続させると距離に依存するパスロス、シャドウィングロス、マルチパスフェージングにより伝搬ロスが非常に大きくなる場合があるため、送信電力が膨大となることがある。そこで、無線ポート間をマルチホップ伝送して中央無線ポートと接続させる方法により送信電力を低減することが考えられる。この場合の経路選択通信方法はマルチホップネットワーク、アドホックネットワーク[4][5]に関する研究を参考にできよう。しかし、本論文の検討ではバーチャルセルの送信電力効率に関する有効性について議論するため、複数の無線ポートが中央無線ポートと理想的に通信を行えるものと仮定し、無線ポート～中央無線ポート間の通信方式については言及していない。本論文は、バーチャルセルラシステムの平均送信電力と周波数繰り返し距離を求め、従来のセルラシステムと比較しその有効性を示すことを目的としている。

3. バーチャルセルラにおける総送信電力低減効果

TDMA を仮定し、同一バーチャルセル内からの干渉はないものとし、6つの干渉バーチャルセルを考える(図2)。無線ポートはバーチャルセル内にランダムに分散配置されている。移動局～無線ポート間の距離は短いものとし、遅延波の影響は考慮せず、非周波数選択性レイリーフェージングを仮定する。歩行程度の移動速度を考え、受信局における信号電力対雑音電力比(SNR)を一定とする理想的な高速送信電力制御(高速TPC)を仮定する。実際には干渉波も存在するので、干渉電力の影響を考慮して、送信電力制御のターゲット値を決定しなければならない。送信電力制御のターゲットSNR値を $(S/N)_t$ とし、所要SINRからのオフセット値として χ を与える[3]。

$$\left(\frac{S}{N}\right)_t = \chi \cdot \gamma_{req} \quad (1)$$

変復調方式としてQPSK同期検波を仮定する。所要受信信号電力対雑音電力+干渉電力比(SINR) γ_{req} は所要のビット誤り率を P_{breq} とすると、次式から求められる。

$$P_{breq} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{\gamma_{req}}{2}} \right) \quad (2)$$

以下では簡単のため、正六角形のバーチャルセルを仮定する。

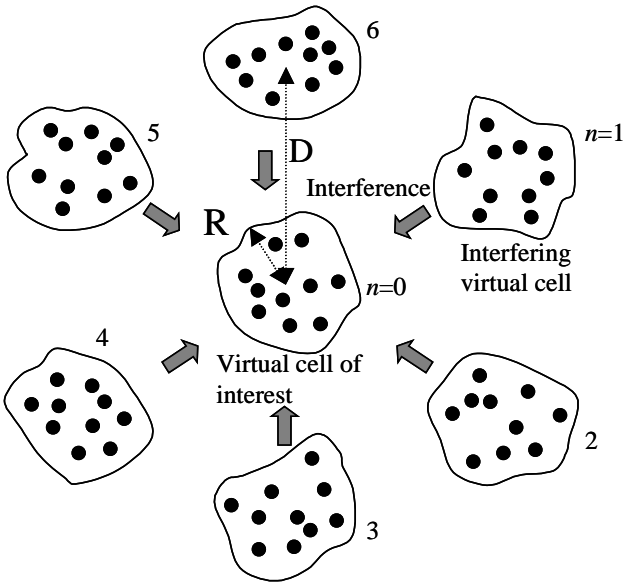


図2 パーチャルセル配置

3.1. 上りリンク

上りリンクでは移動局から送信された信号を複数の無線ポートで受信し，中央無線ポートにおいてダイバーシチ合成する．ダイバーシチ合成法として最大比合成(MRC)と選択合成(SC)を考える．

(1) MRC

各無線ポートで受信した信号を中央無線ポートにおいてMRC合成する．この合成後のSNRに基づいて，送信電力制御コマンドが各無線ポートから移動局に送信され，移動局の送信電力が制御される．この場合の移動局の送信電力 P_t と中央無線ポートにおけるSINR γ は0番のパーチャルセルを対象とすると次式のように表すことができる．

$$\left\{ \begin{aligned} \left(\frac{P_t}{N} \right) &= \frac{\left(\frac{S}{N} \right)_t}{\sum_{k=0}^K 10^{-\frac{\eta_{n,n(k)}}{10}} r_{n,n(k)}^{-\alpha} \sum_{m=1}^M |\xi_{n,n(k)}(m)|^2} \\ \gamma &= \sum_{k=1}^K \frac{\left(\frac{P_t}{N} \right) 10^{-\frac{\eta_{n,0(k)}}{10}} r_{n,0(k)}^{-\alpha} \sum_{m=1}^M |\xi_{n,0(k)}(m)|^2}{1 + \sum_{n=1}^6 \left(\frac{P_t}{N} \right) 10^{-\frac{\eta_{n,0(k)}}{10}} r_{n,0(k)}^{-\alpha}} \end{aligned} \right. \quad (3)$$

ここで $r_{n,0(k)}$ は n 番のパーチャルセルの移動局と0番のパーチャルセルの k 番の無線ポートとの距離， α はパスロス指数， $\eta_{n,0(k)}$ は n 番のパーチャルセルの移動局と0番のパーチャルセルの k 番の無線ポート間のシャドウイング(dB)， $\xi_{n,0(k)}(m)$ は n 番のパーチャルセルの移動局と0番のパーチャルセルに存在している k 番の無線ポートの m 番目のアンテナ間のチャンネル利得， K は単位パーチャルセル内の無線ポート数， M は無線ポートにおける受信アンテナ数である．

(2) SC

各無線ポートで受信された信号を中央無線ポートへ送信し，最も受信電力の大きい無線ポートからの受信信号を復調する．最も瞬間受信電力の大きい無線ポートを k とすると次式が成り立つ．

$$\left\{ \begin{aligned} 10^{-\frac{\eta_{n,n(k)}}{10}} r_{n,n(k)}^{-\alpha} \sum_{m=1}^M |\xi_{n,n(k)}(m)|^2 \\ = \max_{j \in (1, \dots, K)} \left\{ 10^{-\frac{\eta_{n,n(j)}}{10}} r_{n,n(j)}^{-\alpha} \sum_{m=1}^M |\xi_{n,n(j)}(m)|^2 \right\} \end{aligned} \right. \quad (4)$$

移動局の送信電力 P_t と0番のパーチャルセルの k 番の無線ポートにおけるSINR γ は次式のように表すことができる．

$$\left\{ \begin{aligned} \left(\frac{P_t}{N} \right) &= \frac{\left(\frac{S}{N} \right)_t}{10^{-\frac{\eta_{n,n(k)}}{10}} r_{n,n(k)}^{-\alpha} \sum_{m=1}^M |\xi_{n,n(k)}(m)|^2} \\ \gamma &= \frac{\left(\frac{S}{N} \right)_t}{1 + \sum_{n=1}^6 \left(\frac{P_t}{N} \right) 10^{-\frac{\eta_{n,0(k)}}{10}} r_{n,0(k)}^{-\alpha}} \end{aligned} \right. \quad (5)$$

(3) 従来のセルラシステム

比較のために従来のセルラシステムにおける移動局の送信電力 P_t と基地局におけるSINR γ を求める．これらは次式のように表される．

$$\left\{ \begin{aligned} \left(\frac{P_t}{N} \right) &= \frac{\left(\frac{S}{N} \right)_t}{10^{-\frac{\eta_{n,n}}{10}} r_{n,n}^{-\alpha} \sum_{m=1}^M |\xi_{n,n}(m)|^2} \\ \gamma &= \frac{\left(\frac{S}{N} \right)_t}{1 + \sum_{n=1}^6 \left(\frac{P_t}{N} \right) 10^{-\frac{\eta_{n,0}}{10}} r_{n,0}^{-\alpha}} \end{aligned} \right. \quad (6)$$

ここで $r_{n,0}$ は n 番のセルの移動局と0番の基地局との距離， $\eta_{n,0}$ は n 番のセルの移動局と0番の基地局間のシャドウイング(dB)， $\xi_{n,k}(m)$ は n 番のセルの移動局と k 番の基地局の m 番目のアンテナ間のチャンネル利得である．

3.2. 下りリンク

下りリンクではパーチャルセル内の全ての無線ポートから同時に送信された信号を移動局で受信し合成する

複数送信ダイバーシチ(Multi TD)と、最も伝搬ロスの小さな無線ポートのみから送信するサイト選択送信ダイバーシチ (SSTD) を考える。

(1) Multi TD

各無線ポートから同一の送信電力で送信された信号を移動局において最大比合成する。各無線ポートの送信電力 P_t と 0 番のバーチャルセルの移動局における SINR γ は次式のように表すことができる。

$$\left\{ \begin{aligned} \left(\frac{P_t}{N}\right) &= \frac{\left(\frac{S}{N}\right)_t}{\sum_{k=1}^K 10^{\frac{\eta_{n,n(k)}}{10}} r_{n,n(k)}^{-\alpha} \sum_{m=1}^M |\xi_{n,n(k)}(m)|^2} \\ \gamma &= \frac{\left(\frac{S}{N}\right)_t}{1 + \sum_{n=1}^6 \sum_{k=1}^K \left(\frac{P_t}{N}\right) 10^{\frac{\eta_{0,n(k)}}{10}} r_{0,n(k)}^{-\alpha}} \end{aligned} \right. \quad (7)$$

(2) SSTD

各無線ポートで移動局からの受信電力を測定し、その結果を中央無線ポートで比較した上で、最も伝搬ロスの小さい無線ポートを決定し、その無線ポートから信号を送信する。いま、最も伝搬ロスの小さい無線ポートを k とすると上りリンクの場合と同様に式(4)が成り立つ。この k 番の無線ポートの送信電力 P_t と 0 番のバーチャルセルの移動局における SINR γ は次式のように表すことができる。

$$\left\{ \begin{aligned} \left(\frac{P_t}{N}\right) &= \frac{\left(\frac{S}{N}\right)_t}{10^{\frac{\eta_{n,n(k)}}{10}} r_{n,n(k)}^{-\alpha} \sum_{m=1}^M |\xi_{n,n(k)}(m)|^2} \\ \gamma &= \frac{\left(\frac{S}{N}\right)_t}{1 + \sum_{n=1}^6 \left(\frac{P_t}{N}\right) 10^{\frac{\eta_{0,n(k)}}{10}} r_{0,n(k)}^{-\alpha}} \end{aligned} \right. \quad (8)$$

(3) 従来のセルラシステム

比較のために従来のセルラシステムにおける基地局の送信電力 P_t と 0 番のセルの移動局における SINR γ を求める。これらは次式のように表される。

$$\left\{ \begin{aligned} \left(\frac{P_t}{N}\right) &= \frac{\left(\frac{S}{N}\right)_t}{10^{\frac{\eta_{n,n}}{10}} r_{n,n}^{-\alpha} \sum_{m=1}^M |\xi_{n,n}(m)|^2} \\ \gamma &= \frac{\left(\frac{S}{N}\right)_t}{1 + \sum_{n=1}^6 \left(\frac{P_t}{N}\right) 10^{\frac{\eta_{0,n}}{10}} r_{0,n}^{-\alpha}} \end{aligned} \right. \quad (9)$$

4. 計算機シミュレーション

バーチャルセル当りの平均送信電力および同一周波数の再利用距離を求める。ここで平均送信電力とは、上りリンクの場合は1移動局あたりの送信電力、下りリンクの場合は1移動局と通信している無線ポートの総送信電力を示す。移動局および無線ポートはランダムに配置する。所要ビット誤り率を 10^{-3} 、 $\chi=10$ dB とする。

4.1. 送信電力効率

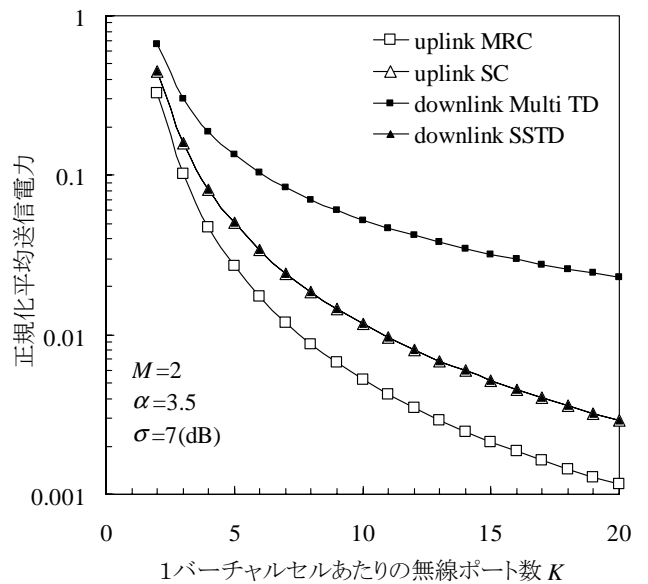


図3 正規化平均送信電力

図3に従来のセルラシステムのセル当りの平均送信電力で正規化した正規化平均送信電力と無線ポート数の関係を示す。パスロス指数 $\alpha=3.5$ 、シャドウィングの標準偏差 $\sigma=7$ (dB)、アンテナ数 $M=2$ とする。いずれの場合もバーチャルセルを導入することにより平均送信電力を低減できることがわかる。例えば無線ポート数が8局の場合、上りMRCのときには、従来セルラシステムの1/100以下になる。SCでは、MRCに較べダイバーシチ効果が低減するので、平均送信電力はMRCの場合の約2倍の値になる。一方、下りリンクの場合、SSTDの平均送信電力はMulti TDの場合よりも小さくなる。これは、SSTDの場合には1局の無線ポートが

しかし送信されないのに対し、Multi TD の場合には全ての無線ポートから同一の送信電力で送信されるからである。下り Multi TD において、 $K=10$ の場合の 1 無線ポートあたりの送信電力は $1/100$ 以下であり、この値は上り MRC の場合とほぼ一致している。

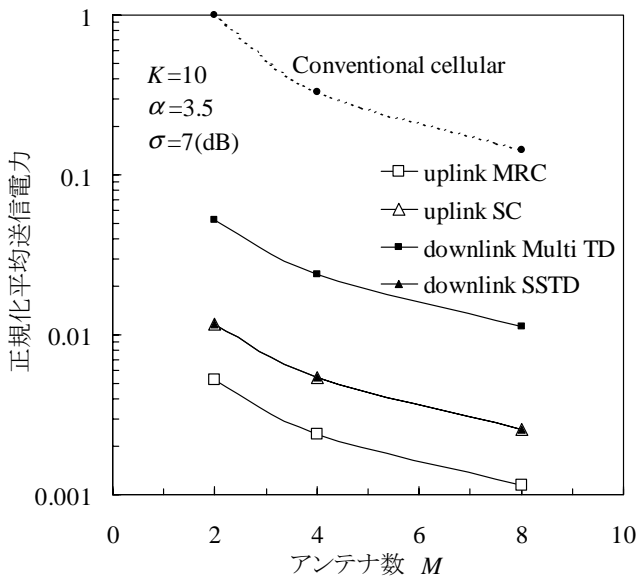


図4 アンテナ数と正規化平均送信電力の関係

図4にアンテナ数 M と正規化平均送信電力を示す。ここで、縦軸は $M=2$ のときの従来のセルラシステムの送信電力で正規化している。また、1 パーチャルセル当りの無線ポート数 $K=10$ としている。アンテナ数にかかわらず、パーチャルセルを導入することにより平均送信電力を低減できる。また、 $M=2$ のときの場合と同様に上りリンクでは SC よりも MRC の方が大幅に送信電力を小さくでき、下りリンクでは Multi TD よりも SSTD の方が大幅に送信電力を小さくできる。

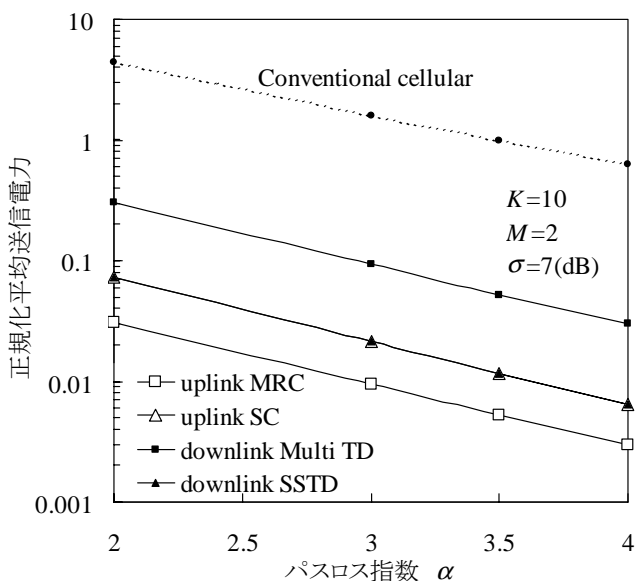


図5 パソロス指数と正規化平均送信電力の関係

図5にパソロス指数を横軸にした正規化平均送信電力を示す。ここで、縦軸は $\alpha=3.5$ のときの従来のセルラシステムの送信電力で正規化している。いずれの場合もパーチャルセルを導入することにより、平均送信電力を低減できる。また、パソロス指数が大きくなるほど、平均送信電力は小さくなる。これはパソロス指数が大きいほど、干渉電力も小さくなるので、送信電力も小さくできるからである。

5. パーチャルセルラにおける周波数繰り返し距離

所要の SINR を満たさない確率を劣化率とする。劣化率が 10% となるときの正規化周波数繰り返し距離 D/R を求めると図6のようになる。ここで、パソロス指数 $\alpha=3.5$ 、シャドウイングの標準偏差 $\sigma=7$ dB、アンテナ数 $M=2$ としている。横軸は無線ポート数を示す。この図から、いずれの場合も無線ポート数が多いほど周波数繰り返し距離が短くなることわかる。本シミュレーションでは正六角形のパーチャルセルを仮定しているので、クラスタサイズ $F=(1/3)(D/R)^2$ となる[6]。したがって、 D/R が $\sqrt{3}$ より小さくなる場合には、 $F < 1$ となり、1つのパーチャルセル内で同一周波数を再利用することも可能となることを示唆している。例えば、4つの特性のうち最も D/R が大きい下り MRC の場合でさえ、無線ポートが 9 局以上あれば同一周波数を同一パーチャルセル内で再利用できる可能性がある。

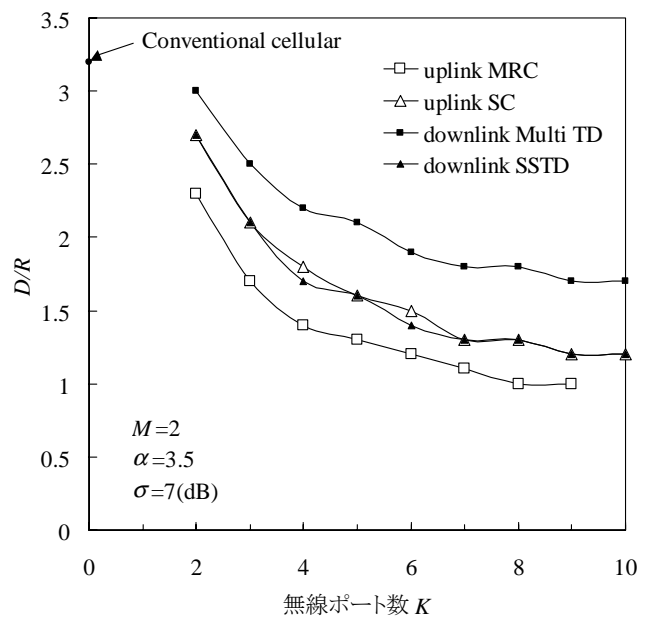


図5 周波数繰り返し距離

6. むすび

セル半径を極小化した超高速無線ネットワークを実現するためにパーチャルセルラシステムを提案した。パーチャルセルは多数の分散配置された無線ポートから構成される仮想的なセルであり、複数の無線ポートが協調してあたかも1つのセルのように動作する。パーチャルセルラシステムは無線ポート間通信にマルチホップネットワーク、アドホックネットワークを導入す

ることにより、フレキシブルなシステムになりうる。本論文では、バーチャルセルラシステムの送信電力効率、周波数繰返し距離について計算機シミュレーションにより明らかにした。その結果、バーチャルセルラシステムは従来のセルラシステムに較べ、平均送信電力を著しく低減でき、周波数繰返し距離を短くできることを示した。さらに、バーチャルセルラシステムでは OFDM, TDMA, FDMA 等のどのアクセス方式を用いても、同一無線周波数を同一バーチャルセル内で再利用できる可能性があることを示した。

参考文献

- [1] F. Adachi, "Wireless Past and Future-Evolving Mobile Communication Systems", IEICE Trans. Fundamentals, vol. E84-A, no.1, pp.55-60, Jan. 2001.
- [2] T. Otsu, Y. Aburakawa and Y. Yamao, "Multi-Hop Wireless Link System for New Generation Mobile Radio Access Networks", IEICE Trans. Commun., vol. E85-B, no.8, pp.1542-1551, Aug. 2002.
- [3] F. Adachi, A. Katoh and D. Garg, "Joint Effect of Transmit Power Control and Antenna Diversity on Spectrum Efficiency of a Cellular System", IEICE Trans. Commun., vol. E85-B, no.5, pp.919-928, May. 2002.
- [4] "Special issue: mobile adhoc networking-research, trends and applications", Wirel. Commun. Mob. Compt., Feb. 2002.
- [5] "無線アドホックネットワーク技術論文特集", IEICE Trans. Commun., vol.J85-B, no.12, Dec. 2002.
- [6] 奥村善久, 進士昌明編, *移動通信の基礎*, 信学会, 1986.