

セルラー環境における分散アンテナネットワークの周波数利用効率に関する一検討

松田 大輝[†] 留場 宏道[†] 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: [†]{matsuda, tomeba}@mobile.ecei.tohoku.ac.jp, [‡]adachi@ecei.tohoku.ac.jp

あらまし 移動無線通信では、フェージング、シャドウイングや伝搬損失によって受信レベルが変動するため品質劣化が発生する。一つの移動局に多数の送受信アンテナを集中させるよりも、それらを分散配置して移動局に送信したり、移動局送信信号を受信する分散アンテナネットワークにより、品質劣化を救済できる。これまで、筆者らは、シングルセル下りリンクを対象に最大比送信ダイバーシチを用いる分散アンテナネットワークについて検討し、送信ダイバーシチに参加するアンテナ数が増加するにつれて受信信号対雑音電力比が増加し、チャンネル容量が増加することを示してきた。本論文では、セルラー環境下における下りリンク最大比送信を用いる分散アンテナネットワークの周波数利用効率を計算機シミュレーションにより明らかにしている。

キーワード 分散アンテナネットワーク, 最大比送信ダイバーシチ, セルラー環境, 周波数利用効率

A Study on Frequency Efficiencies of Distributed Antenna Network in Cellular System

Hiroki MATSUDA[†] Hiromichi TOMEBA[†] 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: [†]{matsuda, tomeba}@mobile.ecei.tohoku.ac.jp, [‡]adachi@ecei.tohoku.ac.jp

Abstract In mobile communication systems, the received signal level varies due to fading, shadowing and path loss and therefore, the transmission performance degrades. Instead of using all of transmit antennas at one position, the outage probability in a service area can be improved by distributed antenna network (DAN) in which transmit antennas are distributed over the service area to transmit signal to mobile station and to receive signal from mobile station. Recently, we discussed a distributed antenna network (DAN) using maximal ratio transmission (MRT) diversity in single cell and downlink transmission and showed that received SNR (signal-to-noise) increases as the number of transmit antennas increases, resulting in the increasing channel capacity. In this paper, we evaluate, by computer simulation, the frequency efficiencies of DAN using MRT diversity in the cellular system and downlink transmission.

Keyword Distributed antenna network, maximal ratio transmission diversity, cellular system, frequency efficiency

1. まえがき

移動無線通信では移動局周辺の建造物などによって電波が回折、反射をされるため、多重伝搬路が形成される。この結果異なる方向から到来する電波が互いに干渉しあうマルチパスフェージングが発生し、通信品質が劣化してしまう[1]。通信品質の向上にはアンテナダイバーシチ技術が有効である[1]。最近では、移動端末の複雑性の問題を解決して品質向上を図ることのできる送信アンテナダイバーシチが注目を集めている[2]-[7]。文献[6]では、同一送信信号に最大比重みを乗算して多数のアンテナから送信する最大比送信(Maximal Ratio Transmission : MRT) ダイバーシチが

議論されている。MRTではよく知られたMRC受信ダイバーシチ[1]と等価なダイバーシチ利得を得ることができる。フェージングによる伝送特性劣化はアンテナダイバーシチによって救済できるが、送信点からの距離に依存する伝搬損失やシャドウイングによる平均受信レベルの変動は、単一无線局に配置したアンテナを用いる送信ダイバーシチでは、それらによる伝送特性劣化を救済することが難しい。そこで最近、送受信アンテナを空間的に充分離して配置する分散アンテナネットワーク(Distributed Antenna Network : DAN)[7]-[11]が注目されている。DANで下りリンク送信ダイバーシチを行うことで、平均受信レベルの変動によ

る下りリンク通信品質の劣化を救済することができる。

これまで、筆者らは、下りリンク MRT を用いる DAN を検討し、アンテナ数を増加させるにつれて受信信号対雑音電力比 SNR が増加するため、エリア全体のチャンネル容量を増加できるということを示してきた[12]。しかし、これまでの検討はシングルセル環境を対象としており、他セルからの干渉が与える影響については未検討であった。そこで本論文では、セルラー環境における下りリンク MRT を用いる DAN の周波数利用効率を計算機シミュレーションにより明らかにしている。

本論文の構成は以下のようになっている。第 2 章では DAN モデルを述べ、下りリンク MRT を用いる DAN のセルラー環境下における瞬時受信信号対干渉電力比 (SIR) を導出している。第 3 章では周波数利用効率を計算機シミュレーションにより求めている。最後に第 4 章でまとめる。

2. ネットワークモデル

2.1. 伝搬モデル

本論文では周波数非選択性下りリンクを考え、1 セルあたりに 1 ユーザが存在するものとする。送信電力を P_t とすると、第 i 送信アンテナからの距離 R_i における瞬時受信電力 $P_{r,i}$ は次式のように表せる。

$$P_{r,i} = P_t \cdot R_i^{-\alpha} \cdot 10^{-\frac{\eta_i}{10}} \quad (1)$$

上式を次式のように変形する。

$$P_{r,i} = P \cdot r_i^{-\alpha} \cdot 10^{-\frac{\eta_i}{10}} \quad (2)$$

ここで、 $P = P_t R^{-\alpha}$ であり、 $r_i (= R_i/R)$ は R をセル半径としたときの正規化距離、 α は伝搬損失指数、 η_i は平均値 0 で標準偏差 σ の正規分布に従うシャドウイング損失 (dB) を表す。

2.2. マルチセル DAN

セルラー方式では限られた周波数帯域を有効に利用するために同一周波数を異なるセルで繰り返し使用する[13]。本論文で仮定するセルラー方式における DAN のモデルを図 1 に示す。各セル内には多数の分散アンテナが配置され、セルの中心の基地局と各分散アンテナは光ファイバーで繋がれている。一方、同一周波数を使用する他セルの分散アンテナからの信号は干渉となって受信され、通信品質を劣化させる。同一周波数を使用するセル間距離を長くすることによって他セルからの干渉を小さくできる。しかし同一周波数を使用するセル間の距離を長くすることは異なるチャンネル群の数 (これはクラスタサイズと呼ばれる) を大き

くすることになるから、各基地局に割り当てることができるチャンネル数が少なくなる。すなわち、周波数利用効率は低下してしまう。

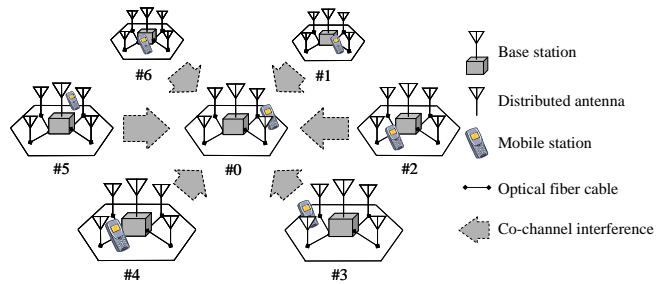


図 1 分散アンテナネットワーク (DAN)。

2.3. 分散アンテナ配置

本論文で仮定する分散アンテナ配置モデルを図 2 に示す。各セルに N 本の送信アンテナを配置するものとし、各セルの中心に基地局 (Base Station : BS) を配置するものとする。アンテナ数 $N=1$ のときが従来のセルラーシステムになる (図 2(a))。なお本論文では、すべての分散アンテナが自セル内にいるユーザに対するダイバーシチ送信に参加するものとした。

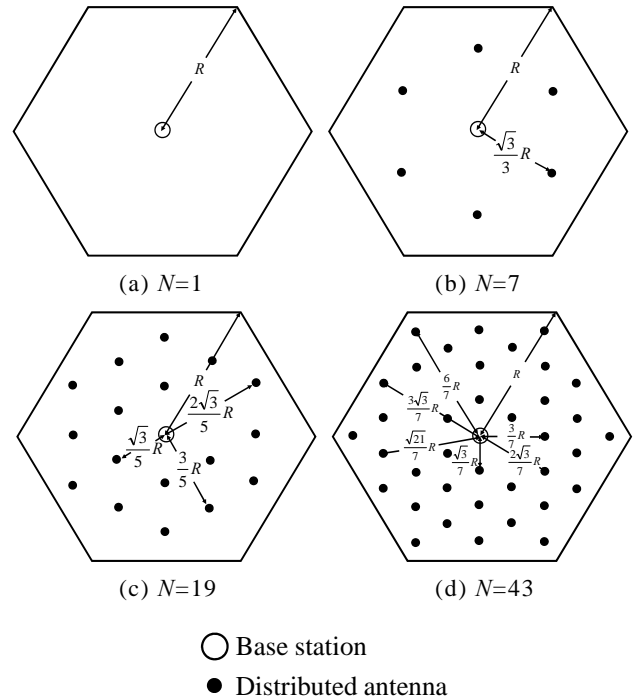


図 2 分散アンテナ配置パターン。

2.4. 送信信号

本論文では、対象としている 0 番セルと、それと同じ周波数を使用する 0 番セルからもっとも近い周辺 6 干渉セルを考慮している (図 1)。また、セル内のすべての送信アンテナが同時送信に参加するものと仮定する。

このとき、第 m セルに存在する移動局(Mobile Station : MS)に送信される送信信号を $N \times 1$ 送信信号ベクトル \mathbf{x}_m で表すと、 \mathbf{x}_m は次式のように表せる。

$$\mathbf{x}_m = \sqrt{2P} \cdot \mathbf{w}_m \cdot s \quad (3)$$

ここで、 $\mathbf{w}_m = [w_m^0, w_m^1, \dots, w_m^i, \dots, w_m^{N-1}]^T$ は $N \times 1$ 複素送信重みベクトル、 s は送信シンボルである。また、 w_m^i は第 m セルの第 i アンテナから送信される信号に乗算される複素送信重みを表す。なお、 $\|\mathbf{w}_m\|^2=1$ および $|s|^2=1$ であるものとする。 $\|\cdot\|$ はベクトルのノルム演算を表す。

本論文では、瞬時受信 SNR を最大とする MRT ダイバーシチ[6]を考える。このとき w_m^i は次式で与えられる。

$$w_m^i = \frac{\sqrt{\Omega_m^{c,i}} \mathbf{g}_m^{c,i*}}{\|\mathbf{h}_m^c\|} \quad (4)$$

ここで、また、 \mathbf{h}_m^c は $N \times 1$ チャネルベクトルであり、次式で与えられる。

$$\mathbf{h}_m^c = [\sqrt{\Omega_m^{c,0}} \mathbf{g}_m^{c,0}, \sqrt{\Omega_m^{c,1}} \mathbf{g}_m^{c,1}, \dots, \sqrt{\Omega_m^{c,i}} \mathbf{g}_m^{c,i}, \dots, \sqrt{\Omega_m^{c,N-1}} \mathbf{g}_m^{c,N-1}]^T \quad (5)$$

ここで、 $\mathbf{g}_m^{c,i}$ は第 c 番目のセルの i 番目の送信アンテナと第 m 番目のセルにいる移動局との間のフェージング利得を表し、 $\mathbf{E}[|\mathbf{g}_m^{c,i}|^2]=1$ である。 $\Omega_m^{c,i}$ は第 c 番目のセルの i 番目の送信アンテナと第 m 番目のセルにいる移動局との間の伝搬損失とシャドウイング損失を表し、次式で計算される。

$$\Omega_m^{c,i} = (r_m^{c,i})^{-\alpha} \cdot 10^{-\frac{\eta_m^{c,i}}{10}} \quad (6)$$

ここで、 $r_m^{c,i}$ は第 c 番目のセルの i 番目の送信アンテナと第 m 番目のセルにいる移動局との間の正規化距離を表す。MRT では、全送信アンテナと移動局間のチャネル情報を必要とする。

第 m セルにいる移動局に受信される受信信号 y_m は次式のように表せる。

$$y_m = \mathbf{h}_m^m \mathbf{x}_m + \sum_{i=0, i \neq m}^6 \mathbf{h}_m^i \mathbf{x}_i + n \quad (7)$$

ここで、 $\sum_{j=0, j \neq m}^6 \mathbf{h}_m^j \mathbf{x}_j$ は干渉信号、 n_m は白色複素ガウス雑音を表している。

2.5. 瞬時受信 SIR

本論文では干渉リミテッドモデルを仮定し、第 0 セルにいるユーザを希望ユーザとする。式(7)より瞬時受

信信号対干渉電力比(SIR)は次式のように求められる。

$$\text{SIR} = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} \left| \sqrt{\Omega_0^{0,i}} \mathbf{g}_0^{0,i} \right|^2}{\sum_{c=1}^6 \sum_{i=0}^{N-1} \left| w_c^i \sqrt{\Omega_0^{c,i}} \mathbf{g}_0^{c,i} \right|^2} \quad (8)$$

2.6. 周波数利用効率

希望セルの中心と希望セルから最も近い干渉セルの中心の間隔を D とする。このとき、クラスタサイズ F は次式で与えられる[13]。

$$F = \frac{1}{3} \left(\frac{D}{R} \right)^2 \quad (9)$$

ここで、 D は、所要品質を確保するために必要な所要 SIR および許容アウトエージ確率(所要 SIR を満たさない確率)から求められる。 F が大きくなるにつれ、各セルに分配される帯域幅が減少するから、周波数利用効率に反比例することになる。そこで、本稿では周波数利用効率 η を次式で表わす。

$$\eta = \frac{1}{F} \quad (10)$$

3. 計算機シミュレーション

シミュレーション諸元を表 1 に示す。シミュレーションでは、はじめに各セルに移動局位置を発生させ、各移動局と各アンテナ間のチャネルベクトル \mathbf{h}_m^c を生成する。そして、式(8)に従い瞬時受信 SIR を計算する。以上を十分繰り返すことにより、瞬時受信 SIR の累積分布を求めた。

表 1. シミュレーション諸元

Fading model	Rayleigh fading
Number of antennas N / cell	1,7,19,43
Path loss exponent α	3.5
Shadowing loss standard variation σ	7.0 (dB)
Channel estimation	Ideal

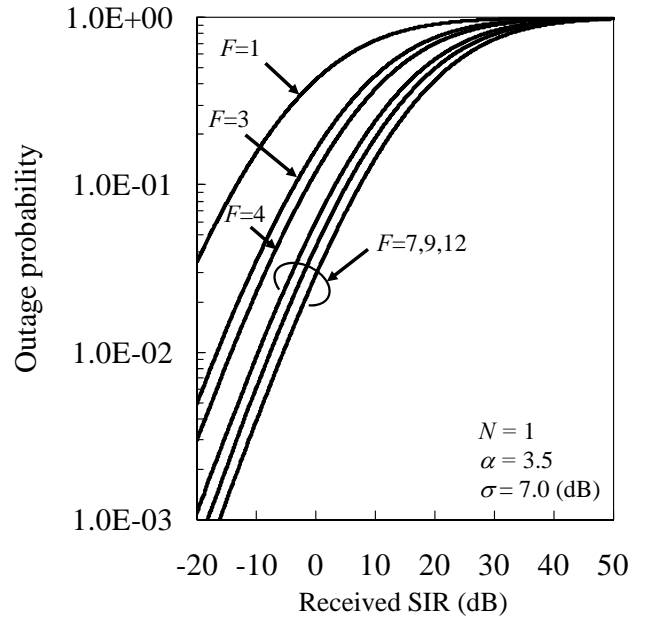
3.1. 瞬時受信 SIR 分布

1 セルあたりのアンテナ本数 N を 1, 7, 19 および 43 本とした時の瞬時受信 SIR 累積分布を、クラスタサイズ F をパラメータとして図 3 に示す。図 3 より、 F を大きくするにつれて瞬時受信 SIR が小さくなる確率を低減できることが分かる。これは、 F を大きくすることで同一周波数を使用するセル間の距離が大きくなり、それにより干渉電力が小さくなるためである。また、セルあたりの送信アンテナ数を増加させることで受信 SIR が低下する確率をより小さくできることが分かる。

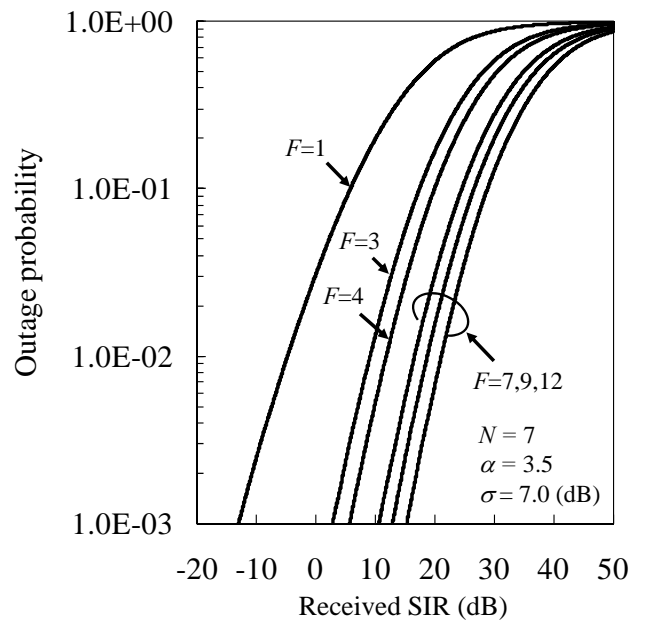
しかし、 F を大きくすると周波数利用効率の低下を招いてしまう。図 3 より、セルあたりのアンテナ本数 N が 1, 7, 19, および 43 本の場合について、所要 SIR が与えられたときにアウトージ確率を 10% とする最大の F の値を求めた。式(10)に周波数利用効率 η と F の関係が示されている。図 4 に、許容アウトージ確率を 10% とするときの所要 SIR と η の関係を、送信アンテナ数 N をパラメータとして示す。図 4 より、送信アンテナ数を増やすにつれて周波数利用効率を向上できることが分かる。この理由を以下で考察する。

受信 SIR が許容値を下回るのは、希望信号電力が低下し、干渉電力が大きくなるときである。そこで、まず、セル内(セル 0)での受信電力の分布を測定した。セル端での平均受信電力で正規化した受信電力 S の累積分布を求め、累積分布値 10% を与える S の値 ($S_{10\%}$) を、移動局間の正規化距離 x の関数として図 5 にプロットした。図 5 より、 $x=1.0$ (すなわちセル端)のとき、 $N=1$ では $S_{10\%}=-13.9\text{dB}$ 、 $N=7$ では $S_{10\%}=8.3\text{dB}$ 、 $N=19$ では $S_{10\%}=16.3\text{dB}$ 、 $N=43$ では $S_{10\%}=23.0\text{dB}$ となり、送信アンテナ数を増やすにつれて $S_{10\%}$ が増加することが分かる。これは、送信アンテナ数 N を増やすにつれて移動局と送信アンテナの最短距離を短くすることができ伝搬損失が小さくなることと、より大きな送信ダイバーシチ利得が得られるためである。

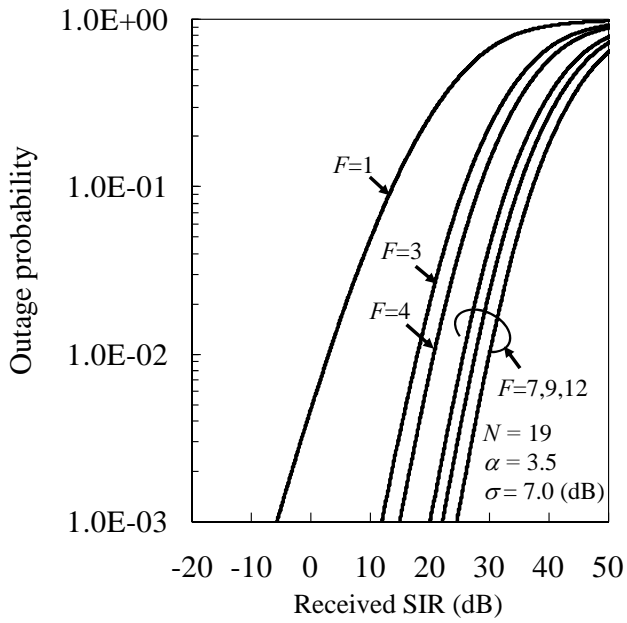
次に、セル 0 が他セルに与える干渉を測定した。累積分布値 90% を与える S の値 ($S_{90\%}$) を、移動局間の正規化距離 x の関数として図 6 にプロットした。図 6 より、 $x=1.0$ のとき、 $N=1$ では $S_{90\%}=8.6\text{dB}$ 、 $N=7$ では $S_{90\%}=12.3\text{dB}$ 、 $N=19$ では $S_{90\%}=13.0\text{dB}$ 、 $N=43$ では $S_{90\%}=14.4\text{dB}$ となり、送信アンテナ数を増やすにつれて $S_{90\%}$ が増加していることが分かる。これは、送信アンテナ数を増やすにつれて、よりセル端に近い地点に分散アンテナが配置されるため、これらのアンテナに大きな電力が分配されたときにセル外へ与える干渉が大きくなってしまふからである。しかし、セル外での $S_{90\%}$ の増加量はセル内での $S_{10\%}$ の増加量に比べてはるかに小さいことが分かる。そのため、送信アンテナ数を増やすことで、周波数利用効率を向上できる。



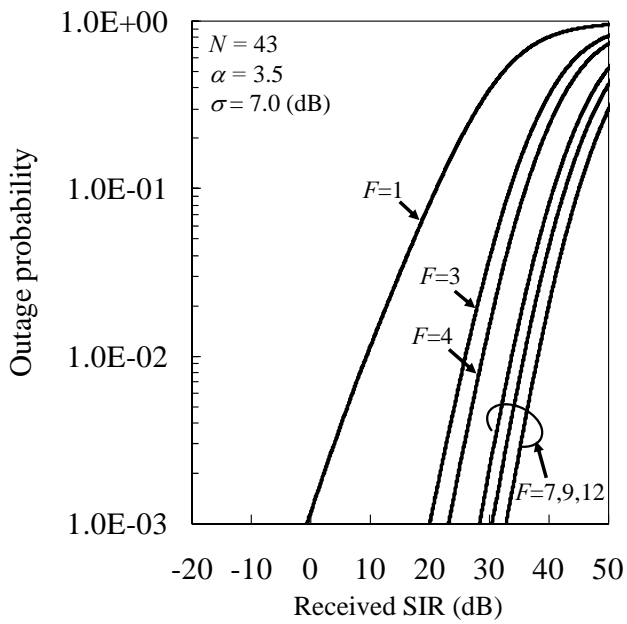
(a) $N=1$



(b) $N=7$



(c) $N=19$



(d) $N=43$

図3 瞬時受信 SIR 分布.

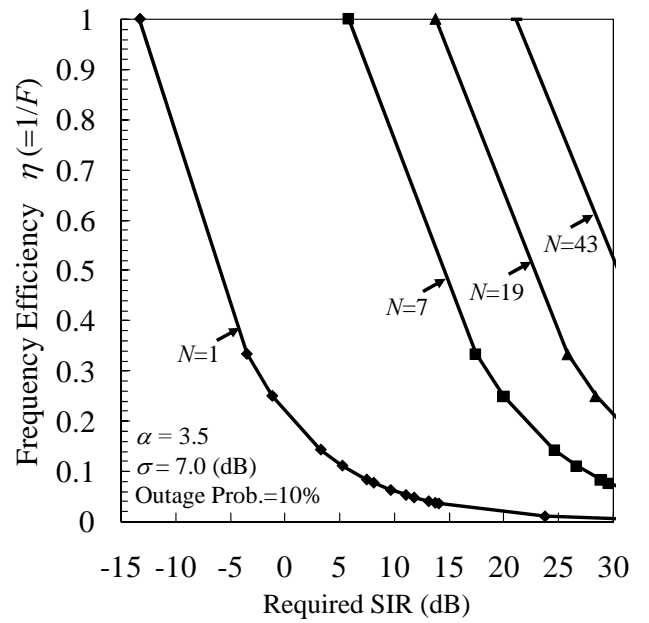


図4 許容アウトエージ10%ときの所要SIRと周波数利用効率 η の関係.

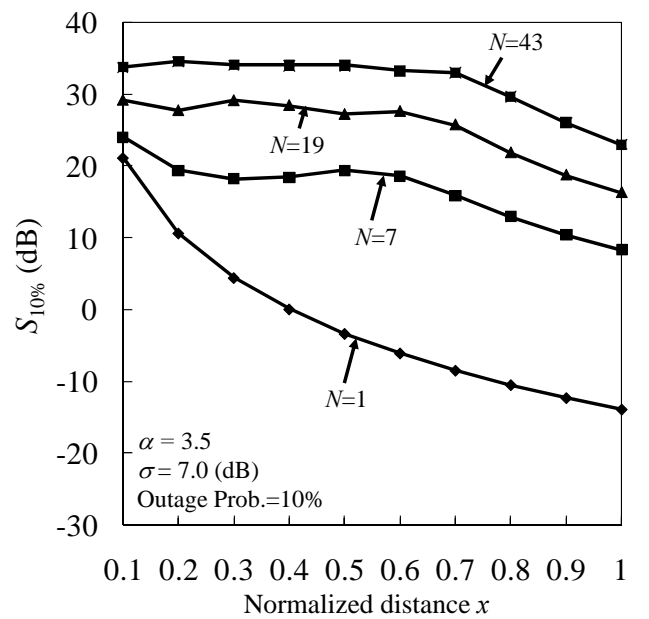


図5 セル内における移動局正規化距離 x と $S_{10\%}$ との関係.

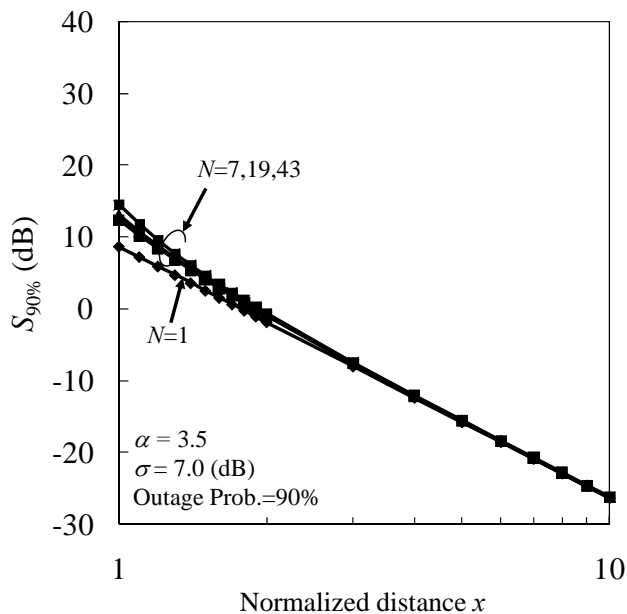


図 6 セル外における移動局正規化距離 x と $S_{90\%}$ との関係.

4. むすび

本論文では、セルラー環境における MRT を用いる DAN の周波数利用効率を計算機シミュレーションにより明らかにした。DAN では、セル内のアンテナ数の増加に伴い、瞬時受信 SIR が大きく改善し、従来のセルラーシステムよりも高い周波数利用効率を実現できることがわかった。これは、送信アンテナ数が増加したことにより大きな送信ダイバーシチ効果を得ることができ、希望受信電力が大きく増加したためであり、また、送信アンテナを空間的に分散することで、移動局と送信アンテナの最短距離が短くなり、結果として移動局位置によらずに大きな希望受信電力を得ることができたためである。

文 献

- [1] J. G. Proakis, *Digital Communications, 2nd ed.* McGraw-Hill, 1995.
- [2] S.M. Alamouti, "A simple transmit diversity technique for wireless communications," *IEEE J.Sel. Areas Commun.*, Vol. 16, No. 8, pp. 1451-1458, Oct. 1998.
- [3] V.Tarokh, H. Jafarkhani, and A.R. Caldebank, "Space-time block codes from orthogonal designs," *IEEE Trans. Inf. Theory*, Vol. 45, No. 5, pp. 1456-1467, July 1999.
- [4] R.T. Derryberry, S.D. Gray, D.M. Ionescu, G. Mandyam, and B. Raghathan, "Transmit diversity in 3G CDMA systems," *IEEE Commun. Mag.*, Vol. 40, No. 4, pp. 68-75, April 2002.
- [5] J. Winters, "The diversity gain of transmit diversity in wireless systems with Rayleigh fading," *IEEE Trans. Vehi. Tech.*, Vol. 47, No. 1, pp. 110-123, Feb. 1998.

- [6] J. K.Cavers, "Single-user and multiuser adaptive maximal ratio transmission for Rayleigh channels," *IEEE Trans. Vehi. Tech.*, Vol. 49, No. 6, pp. 2043-2050, Nov. 2000.
- [7] S. Liu, Z. He, and W. Wu, "Transmit diversity method with user's power constraint for distributed antenna system," *Proc. 2nd International Symposium on Wireless Pervasive Computing (ISWPC '07)*, 5-7 Feb. 2007.
- [8] A. A. M. Saleh, A. J. Rustako, and R. S. Roman, "Distributed antennas for indoor radio communications," *IEEE Trans. Commun.*, Vol. 35, No. 12, pp. 1245-1251, Dec. 1987.
- [9] M. V. Clark, T. M. Willes III, L. J. Greenstein, A. J. Rustako, Jr, V. Erceg and R. S. Roman, "Distributed versus centralized antenna arrays in broadband wireless networks," *Proc. IEEE Veh. Technol. Conf.*, '01-Spring pp. 33-37, May 2001.
- [10] L. Dai, S. Zho, and Y. Yao, "Capacity analysis in CDMA distributed antenna systems," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, Vol. 4, No. 6, pp. 2613-2620, Nov. 2006.
- [11] W. Choi, "Downlink performance and capacity of distributed antenna systems in a multicell environment," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, Vol. 6, No. 1, pp. 69-73, Jan. 2007.
- [12] H. Matsuda, H. Tomeba, and F. Adachi, "Channel Capacity of Distributed Antenna System Using Maximal Ratio Transmission," *The 5th IEEE VTS Asia Pacific Wireless Communications Symposium (APWCS2008)*, Tohoku University, Sendai, Japan, 21-22 Aug., 2008.
- [13] W. C. Jakes, Jr., ed., *Microwave Mobile Communications*, John Wiley & Sons, New York, 1974.