

# 最大比送信を用いる分散アンテナシステムの チャンネル容量に関する一検討

松田 大輝<sup>1</sup> 留場 宏道<sup>2</sup> 安達 文幸<sup>3</sup>

<sup>1</sup>東北大学工学部電気情報物理工学科 <sup>2,3</sup>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 6-6-05

E-mail: <sup>1,2</sup>{matsuda, tomeba}@mobile.ecei.tohoku.ac.jp, <sup>3</sup>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ロス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。この劣化を救済する有効な技術に、同一信号を複数のアンテナから同時送信する送信アンテナダイバーシチがある。下りリンクを対象とした時、一つの無線局に複数のアンテナを集中させるよりも、それらを分散配置することによってサービスエリア内の品質劣化確率を低くできる。本論文では、最大比送信を用いる分散アンテナシステムのチャンネル容量分布を計算機シミュレーションにより求めている。そして、アンテナ数、伝搬損失指数、シャドウイング損失標準偏差がチャンネル容量分布に及ぼす影響について議論している。

**キーワード** 最大比送信, 分散アンテナシステム, チャンネル容量

## A Study on Channel Capacity of Distributed Antenna System Using Maximal Ratio Transmission

Hiroki Matsuda<sup>1</sup> Hiromichi Tomeba<sup>2</sup> and Fumiya Adachi<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Dept. of Electrical and Communication Engineering, School of Engineering, Tohoku University

<sup>2,3</sup>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: <sup>1,2</sup>{matsuda, tomeba}@mobile.ecei.tohoku.ac.jp, <sup>3</sup>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. Transmission antenna diversity, which transmits the same signal from multiple antennas simultaneously, is a promising technique to improve the transmission performance. For the downlink transmission, the outage probability in a service area can be improved by distributing the transmit antennas over the service area instead of using all of them at one position. In this paper, we evaluate the distribution of the channel capacity of a distributed antenna system using maximal ratio transmission (MRT) diversity by computer simulation. We discuss the effect of the number of antennas, path loss exponent, and shadowing loss standard variation on the distribution of channel capacity.

**Keyword** Maximal ratio transmission, distributed antenna systems, channel capacity

### 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、複数の送信アンテナを用いる送信アンテナダイバーシチが注目を集めている[2]-[3]。文献[4]では、同一送信信号に最大比重みを乗算して複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受信レベルは長周期変動するので、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

する分散アンテナシステム (Distributed Antenna Systems:DAS) [3],[5]-[8]が注目されている. 文献[3,8]では MRT を用いる DAS が検討されている.

ところで, DAS を用いた時のチャンネル容量がエリア内でどのように分布しているかを検討するのは重要である. 何故なら, チャンネル容量はパケット伝送における達成可能なスループットの上限を与えるからである. しかし, 論文[3,8]では MRT を DAS に用いた際のチャンネル容量に関する詳細な検討はなされていない. そこで本論文では, MRT を用いる DAS のチャンネル容量のエリア内分布を計算機シミュレーションにより明らかにしている. そして, 等利得送信 (Equal Gain Transmission:EGT), 位相調整を行わずに等電力で送信 (Equal Power Transmission:EPT) する方法と比較し, MRT ダイバーシチが高いチャンネル容量を得ることができることを示している. また, 無線局数, 伝搬損失指数, シャドウイング損失標準偏差がチャンネル容量分布に及ぼす影響を明らかにしている.

本論文の構成は以下のようにになっている. 2 章では分散アンテナシステムモデルを述べ, MRT, EGT, および EPT を用いる分散アンテナシステムのチャンネル容量の計算式を求めている. 3 章ではチャンネル容量の面的分布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. 分散アンテナシステムモデル

### 2.1. 伝搬モデル

本論文では, 周波数非選択性下りリンクでの単一ユーザ通信を考え, 他ユーザ干渉はないものとする.

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,  $R$  は 2.2 節で述べる送信アンテナ間距離であり,  $r_i (=R_i/R (\leq 1))$  は正規化距離,  $\alpha$  は伝搬損失指数,  $\eta_i$  は平均値 0 で標準偏差  $\sigma$  の正規分布に従うシャドウイング損失 (dB) を表す.

### 2.2. 分散アンテナ配置

送信アンテナを格子状に等間隔で図 1 のように配置するものとし, 送信アンテナ間の距離を  $R$  とする. 受信機を中心として, 送信アンテナ間距離  $R$  で正規化した距離  $r$  内に存在する送信アンテナが同時送信に参加

するものとした.

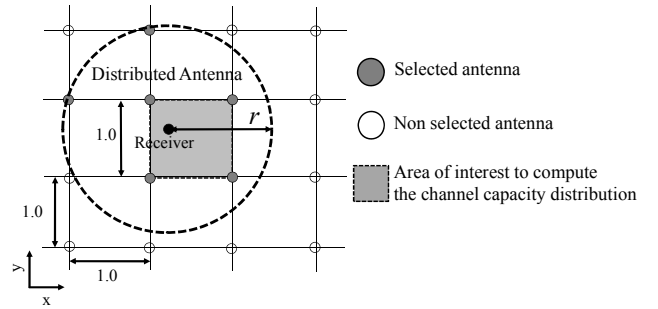


図 1 無線局配置

### 2.3. 送信信号と受信信号

半径  $r$  内に  $N$  個の無線局が存在するものとする. 送信信号を  $N \times 1$  送信信号ベクトル  $\mathbf{x}$  で表すと,  $\mathbf{x}$  は次式のように表せる.

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

ここで,  $P (=P_t R^{-\alpha})$  は, 送信電力が  $P_t$  であるときに最少アンテナ間距離  $R$  だけ離れた地点における平均受信電力,  $\mathbf{w} = [w_0, w_1, \dots, w_i, \dots, w_{N-1}]^T$  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,  $\|\mathbf{w}\|^2 = 1$  および  $|s|^2 = 1$  であるものとする. 本論文では, MRT[4], 等利得送信 (Equal Gain Transmission:EGT), 等電力送信 (Equal Power Transmission:EPT) の 3 つの送信法を考える. 各送信法の  $w_i$  は次式のように表せる.

$$w_i = \begin{cases} \frac{\sqrt{\Omega_i} h_i^*}{\|\mathbf{h}\|} & , \text{MRT} \\ \frac{1}{\sqrt{N}} \cdot \frac{h_i^*}{|h_i|} & , \text{EGT} \\ \frac{1}{\sqrt{N}} & , \text{EPT} \end{cases} \quad (4)$$

ここで,  $\|\cdot\|$  はベクトルのノルム演算を表す. また,  $\mathbf{h}$  は  $N \times 1$  チャンネルベクトルであり, 次式で与えられる.

$$\mathbf{h} = [\sqrt{\Omega_0} h_0, \sqrt{\Omega_1} h_1, \dots, \sqrt{\Omega_i} h_i, \dots, \sqrt{\Omega_{N-1}} h_{N-1}]^T \quad (5)$$

ここで,  $h_i$  はフェージング利得を表し,  $\mathbf{E}[|h_i|^2] = 1$  である.  $\Omega_i$  は  $i$  番目の送信アンテナと受信機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.

$$\Omega_i = r_i^{-\alpha} \cdot 10^{-\frac{\eta_i}{10}} \quad (6)$$

ここで,  $r_i$  は  $i$  番目の送信アンテナと受信機との間の正規化距離を表す. MRT は, 受信信号対雑音電力比

(SNR)を最大とする送信方法である。EGT は、同時送信に参加している全アンテナから等電力で、かつ受信機で同相合成されるように送信する方法である。EPT は、位相調整は行わず、同時送信に参加している全アンテナから等電力で送信をする方法である。MRT と EGT では全送信アンテナと移動機間のチャンネル情報を必要とする。移動機での受信信号  $y$  は次式のように表せる。

$$y = \mathbf{h}^T \mathbf{x} + n \quad (7)$$

ここで、 $n$  は白色複素ガウス雑音を表している。

## 2.4. 瞬時チャンネル容量

チャンネルベクトル  $\mathbf{h}$  が与えられたときの MRT 及び EGT の瞬時受信 SNR  $\gamma(\mathbf{h})$  は式(7)より次式で与えられる。

$$\gamma(\mathbf{h}) = \frac{|\mathbf{h}^T \mathbf{x}|^2}{\mathbf{E}[|n|^2]} = \frac{E_s}{N_0} \mathbf{h} \mathbf{w} \mathbf{w}^H \mathbf{h}^H \quad (8)$$

ここで、 $E_s/N_0$  は 1 シンボル当たりの信号エネルギー対雑音電力スペクトル密度比である。ここで  $E_s = P T_s$  であり、 $T_s$  は変調シンボル長を、 $N_0$  は片側雑音電力スペクトル密度を表す。ところで、 $P = P_t R^{-\alpha}$  であるから、 $E_s/N_0$  は送信電力が  $P_t$  であるとき、最小アンテナ間距離  $R$  だけ離れた地点での平均受信シンボルエネルギー対雑音電力スペクトル密度比である。 $N$  アンテナの総送信  $E_t/N_0$  は、

$$\frac{E_t}{N_0} = \frac{P_t T_s \|\mathbf{w}\|^2}{N_0} = \frac{E_s}{N_0} R^\alpha \quad (9)$$

である。

式(8)より、チャンネルベクトル  $\mathbf{h}$  が与えられた時の MRT および EGT の瞬時チャンネル容量は次式で与えられる。

$$C(\mathbf{h}) = \begin{cases} \log_2 \left( 1 + \frac{E_s}{N_0} \|\mathbf{h}\|^2 \right) & , \text{MRT} \\ \log_2 \left( 1 + \frac{1}{N} \frac{E_s}{N_0} \left( \sum_{i=0}^{N-1} \sqrt{\Omega_i} h_i \right)^2 \right) & , \text{EGT} \end{cases} \quad (10)$$

EPT の場合、 $N$  個の送信アンテナから同時送信された信号は受信機アンテナで非同相合成されて受信されるから、チャンネルベクトル  $\mathbf{h}$  が与えられた時のチャンネル容量は次式で与えられる。

$$C(\mathbf{h}) = \log_2 \left( 1 + \frac{1}{N} \frac{E_s}{N_0} \left| \sum_{i=0}^{N-1} \sqrt{\Omega_i} h_i \right|^2 \right) , \text{EPT} \quad (11)$$

## 3. 計算機シミュレーション

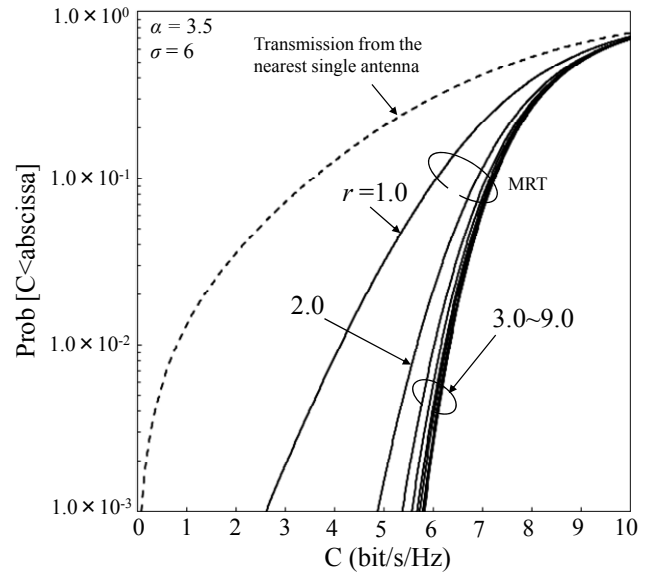
シミュレーション諸元を表 1 に示す。シミュレーションでは、はじめに移動局位置を発生させ、移動局と各アンテナ間のチャンネルベクトル  $\mathbf{h}$  を生成する。そして、このときのチャンネル容量を式(10)および式(11)を用いて計算する。以上を十分繰り返すことにより、チャンネル容量の累積分布を求めた。

表 1. シミュレーション諸元

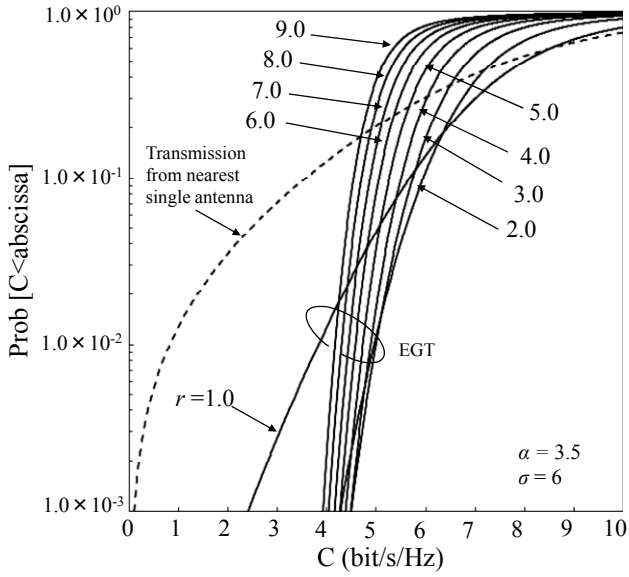
Fading model	Rayleigh fading
Commun range $r$	1.0~9.0
Path loss exponent $\alpha$	3.0~4.0
Shadowing loss standard variation $\sigma$	6.0~8.0 (dB)
Channel estimation	Ideal

### 3.1. チャンネル容量分布

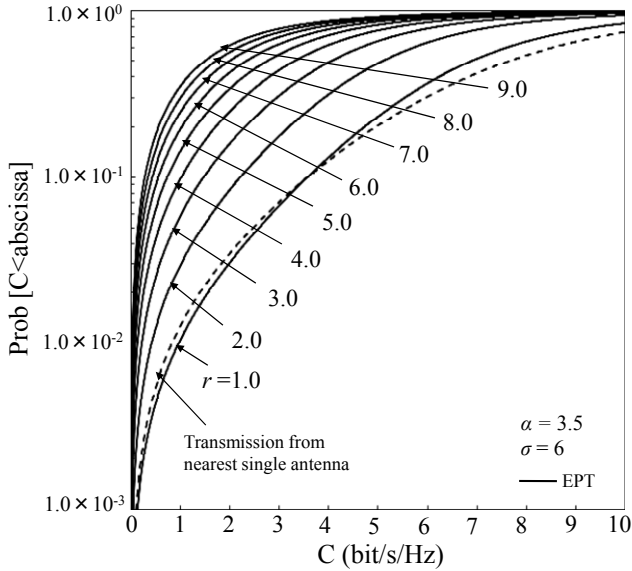
伝搬損失指数  $\alpha$  を 3.5、シャドウイング標準偏差  $\sigma$  を 6.0dB とし、無線局の選択範囲  $r$  をパラメータとした。また、 $E_s/N_0 = 10\text{dB}$  とした。MRT、EGT および EPT を用いた時のチャンネル容量の累積分布を図 2 に示す。比較のために、移動局に最も近い一つのアンテナから送信したときのチャンネル容量の累積分布も図 2 に示してある。



(a) MRT



(b) EGT



(c) EPT

図2 各送信法のチャンネル容量の累積分布

まず MRT について考察する.  $r$  を大きくするにつれて, チャンネル容量が大きくなる確率が増加する. これは, 送信アンテナ数が増えるにつれてダイバーシチ効果がより大きくなるからである. また,  $r$  を最小アンテナ間距離の3倍以上( $r \geq 3$ )にしても累積分布の改善がほとんど見られない. これは,  $r$  が大きくなるにつれて, 移動局から遠い送信アンテナも用いるようになるが, 伝搬損失が大きいため, 遠くの送信アンテナに与える送信重みの大きさがほぼ 0 となるからである. このとき送信に用いるアンテナ数はおよそ 28 である.

次に EGT について考察する.  $r$  を大きくするにつれてチャンネル容量が低下する確率がしだいに小さくなるが,

$r$  を 3 以上にすると逆に大きくなっている. これは, アンテナ数を増やすにつれてダイバーシチ効果は大きくなるものの, 同時送信に参加するアンテナが増えるから 1 アンテナに配分される送信電力が小さくなりすぎるからである.

最後に EPT について述べる.  $r$  を大きくするにつれて, 瞬時チャンネル容量が低下する確率がしだいに大きくなっている. これは, EPT ではダイバーシチ効果が得られない上に, アンテナ数が増えるにつれて 1 アンテナに配分される送信電力が減少するためである.

以下では, 累積確率 1% となるチャンネル容量の最大値を各送信法で比較する. MRT では 6.4bit/s/Hz ( $r=9$  のとき)である. EGT では 5bit/s/Hz ( $r=3$  のとき)である. EPT では 1bit/s/Hz ( $r=1$  のとき)となっている. 以降では MRT のみの検討を行うこととする.

### 3.2. MRT のチャンネル容量に及ぼす伝搬損失指数とシャドウイングの影響

伝搬損失指数  $\alpha$  をパラメータとしてプロットした MRT のチャンネル容量の累積分布を図 3 に示す.  $r=9$  とした累積確率 1% となるチャンネル容量は,  $\alpha=3.0$  のときはおよそ 7bit/s/Hz,  $\alpha=3.5$  のときはおよそ 6.4bit/s/Hz,  $\alpha=4.0$  のときはおよそ 6.0bit/s/Hz となり,  $\alpha$  が大きくなるに従ってチャンネル容量が小さくなっている. この理由は以下のように説明できる. 第  $i$  アンテナに配分される正規化送信電力は  $\rho_i = \mathbf{E}[\frac{|w_i|^2}{\|\mathbf{w}\|^2}]$  であり, 次式で与えられる.

$$\rho_i = \mathbf{E} \left[ \frac{\Omega_i |h_i|^2}{\|\mathbf{h}\|^2} \right] = r_i^{-\alpha} \cdot \mathbf{E} \left[ \frac{10^{-\frac{\eta_i}{10}} |h_i|^2}{\|\mathbf{h}\|^2} \right] \quad (12)$$

$\mathbf{E} [ 10^{-\frac{\eta_i}{10}} \cdot |h_i|^2 / \|\mathbf{h}\|^2 ]$  の統計的性質は全ての送信アンテナで同一であるから, 式(12)は, 伝搬損失指数  $\alpha$  が大きくなるにつれ, 遠方のアンテナほど送信重みが小さくなることを示している. 従って,  $\alpha$  が大きくなるほど, より近くのアンテナしか同時送信に使わなくなるのでダイバーシチ効果が小さくなってしまふ. 4 つのアンテナで囲まれたエリアの中央に移動局が存在している時について各送信アンテナに配分される送信電力の分布を図 4 に示す.  $\alpha$  が小さい場合には多くのアンテナも利用できるので, より大きいダイバーシチ効果を得ることができる.

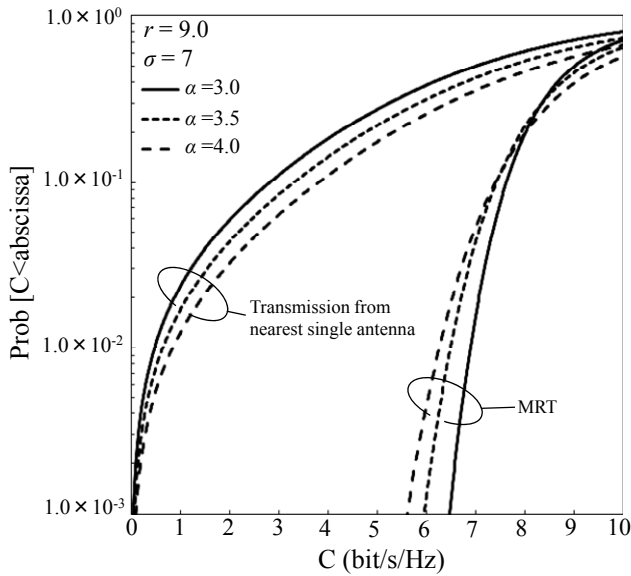


図3 伝搬損失指数 $\alpha$ の影響

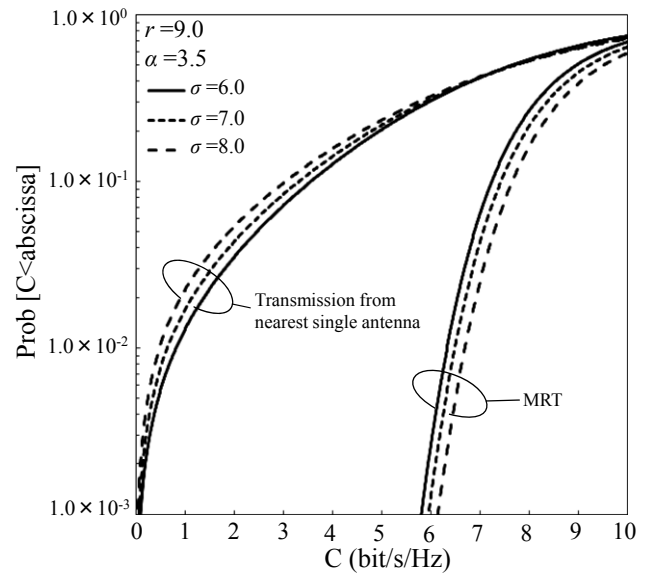


図5 シャドウイング損失標準偏差 $\sigma$ の影響

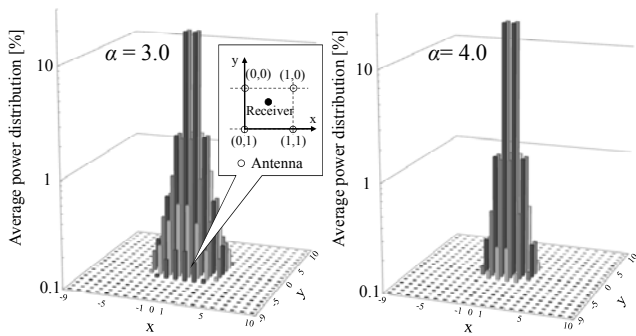


図4 アンテナ電力分布に及ぼす $\alpha$ の影響

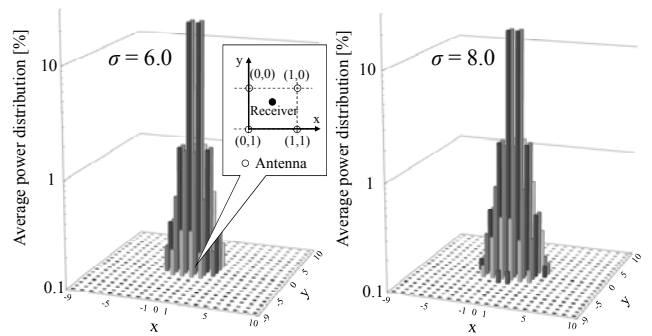


図6 アンテナ電力分布に及ぼす $\sigma$ の影響

次に、シャドウイング損失標準偏差 $\sigma$ をパラメータとしてプロットしたチャネル容量の累積分布を図5に示す。累積確率1%以下となるチャネル容量は、 $\sigma=6.0$ のときはおよそ6.2bit/s/Hz、 $\sigma=7.0$ のときはおよそ6.4bit/s/Hz、 $\sigma=8.0$ のときはおよそ6.6bit/s/Hzとなり、 $\sigma$ の値が大きくなるに従ってチャネル容量が高くなる。この理由は、シャドウイング標準偏差が大きくなるにつれ、より多くのアンテナが同時送信に参加するようになる確率が高くなることから、ダイバーシチ効果が大きくなるためである。このことは、アンテナ電力分布を $\sigma=6.0$ と8.0の場合について比較した図6より分かる。

#### 4. むすび

本論文では、MRTを用いる分散アンテナシステムのチャネル容量の面的分布を計算機シミュレーションにより求めた。MRT分散アンテナシステムでは送信に用いるアンテナ数を多くするほどチャネル容量が高くなり、ある累積分布値を与えるチャネル容量は一定値に近づく。伝搬損失指数 $\alpha$ が3.5、シャドウイング損失標準偏差 $\sigma$ が6.0dBの環境下では、移動局からの正規化距離が3.0以内のアンテナを用いて送信すれば十分なダイバーシチ効果が得られ、チャネル容量が飽和に近づくことがわかった。そして、MRTダイバーシチがEGT、EPTより高いチャネル容量を得ることができることを示した。また、MRT分散アンテナシステムのチャネル容量に及ぼす、伝搬損失指数とシャドウイング損失標準偏差の影響を明らかにした。今後は、送信レベルに基づいて送信アンテナを選択するときのチャネル容量について検討する予定である。

## 5. 参考文献

- [1] J. G. Proakis, *Digital Communications, 2nd ed.* McGraw-Hill, 1995.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] M. V. Clark, T. M. Willes III, L. J. Greenstein, A. J. Rustako, Jr, V. Erceg, R. S. Roman, "Distributed versus centralized antenna arrays in broadband wireless networks," *Proc. IEEE Veh. Technol. Conf.*, pp. 33-37, May 2001.
- [7] 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.
- [8] 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.