

第 508 回 伝送工学研究会

アレー素子の利得アンバランスによる MIMO  
伝送容量の変化に対する実験的検討

柿沼 悠 岩木 孝憲 陳 強 澤谷 邦男

東北大学大学院工学研究科

平成 20 年 2 月 26 日

# アレー素子の利得アンバランスによる MIMO 伝送容量の変化に対する実験的検討

柿沼 悠<sup>†</sup> 岩木 孝憲<sup>†</sup> 陳 強<sup>†</sup> 澤谷 邦男<sup>†</sup>  
 Yu Kakinuma Takanori Iwaki Qiang Chen Kunio Sawaya

<sup>†</sup>東北大学大学院工学研究科

<sup>†</sup>Graduate School of Engineering, Tohoku University

## 1. まえがき

近年、移動体通信や無線 LAN などにおいて、大量の情報を正確に伝送することが求められている。そこで、高信頼性または大容量の情報を伝送する技術として、送受信共に複数のアンテナを用いる Multi-Input Multi-Output (MIMO)通信が注目を集めている。

MIMO 通信は、伝送効率を上昇させる空間分割多重方式 (SDM:Space Division Multiple)などの時空間符号化技術の研究[1]や、MIMO 伝送容量特性に関する電波伝搬特性の研究[2]など様々な研究が盛んに行われている。これらの研究において、送受信アンテナとしてダイポールアレーアンテナや逆 F アレーアンテナなど様々なアンテナが用いられている。そのアレーアンテナは、送受信間で用いられるアンテナが異なることはあっても、送信アンテナまたは受信アンテナとしては、利得差のない同一アンテナを用いて検討を行っていることが多い。しかし、例えばモノポールアンテナと逆 F アンテナで構成されるアレーアンテナを利用する場合、それぞれのアンテナ素子の利得は必ずしも一致しない。このようにアンテナ素子の利得のバランスが取れない場合は、伝送容量がどのような影響を受けるのかに関してあまり検討されていない。

そこで本報告では、屋内 2×2 MIMO 通信システムにおいて、2つのアンテナ素子間の利得差を変化させて行う実験により、利得アンバランスによる伝送容量の変化について明らかにしたことに述べる。

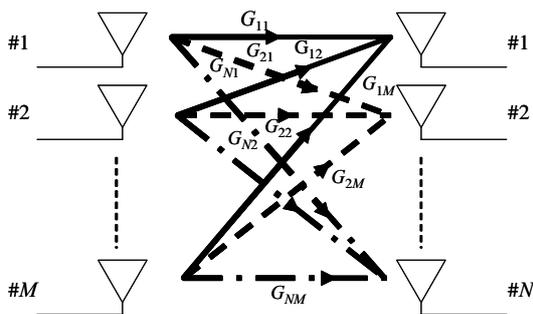


図 1  $N \times N$  MIMO システム

## 2. MIMO 伝送容量の計算

MIMO システムは、図 1 に示すように  $M$  素子の送信アレーアンテナと  $N$  素子の受信アレーアンテナから構成される。送信アンテナ数  $M$  と受信アンテナ数  $N$  が等しい MIMO システムの伝送容量は、以下の式で求めることができる[3]。

$$C = \log_2 \left| I_N + \frac{\rho}{N} \mathbf{H} \mathbf{H}^\dagger \right| \quad (1)$$

$$= \sum_{n=1}^N \log_2 \left( 1 + \frac{\rho}{N} \varepsilon_n^2 \right) \quad (M = N)$$

ここで、 $\rho$  は各アンテナ素子の受信電力の平均値  $P$  と各アンテナ素子に加わる熱雑音の平均値  $N$  より求められるアレー平均受信 SNR、 $I_N$  は単位行列を表している。そして、 $\varepsilon_n^2$  は、以下の式で正規化されたチャネル行列  $\mathbf{H}$  と複素共役チャネル行列  $\mathbf{H}^\dagger$  の行列積  $\mathbf{H} \mathbf{H}^\dagger$  の第  $n$  固有値を表している。

$$\mathbf{H} = \mathbf{A} \mathbf{G} \quad (2)$$

$$\mathbf{A} = \left( \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N |G_{ij}|^2 \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (3)$$

ここで、 $\mathbf{G}$  はチャネル行列である。

## 3. 実験システム

本研究で用いる 2×2 MIMO の実験系は、図 2 に示すように、送信側は 2 素子半波長ダイポールアンテナアレーを使用し、各アンテナに Signal Generator(SG)を使って信号を作成し送信する。受信側は、受信アンテナとして送信側と同じ 2 素子半波長ダイポールアンテナを使用し、受信した信号を Vector Signal Analyzer(VSA)で処理を行い PC の画面に表示する。ここで、2つの SG と VSA は PC で制御している。そして、受信側のアレー素子の利得アンバランスを調

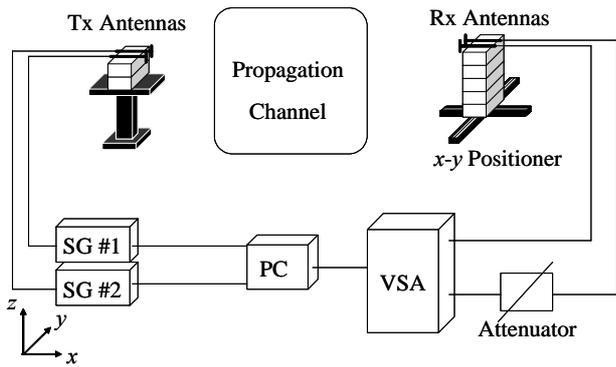


図2 実験系

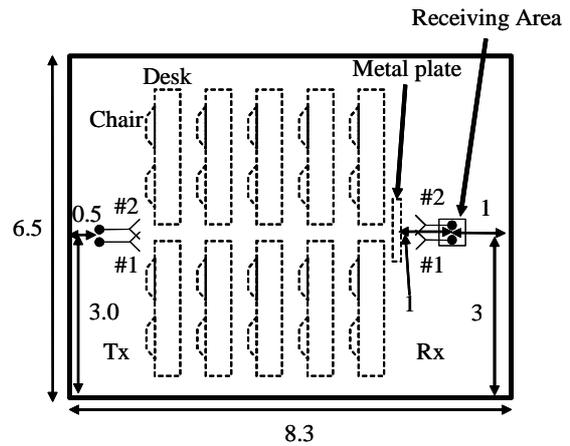


図5 実験環境(屋内環境) [単位: m]



図3 試作した半波長ダイポール

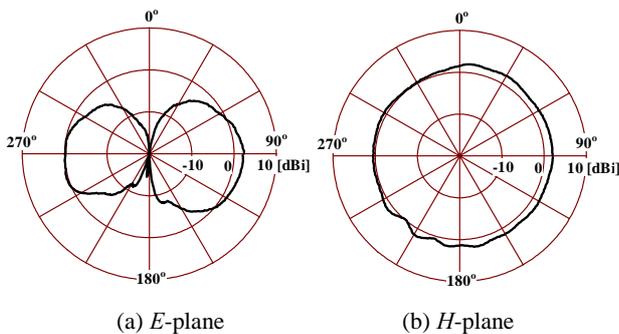


図4 半波長ダイポールの利得パターン

整するために、受信側において、一方の半波長ダイポールアンテナとVSAの間に減衰器を挿入する。図3は実際に実験に用いた半波長ダイポールアンテナの画像で、図4はその半波長ダイポールアンテナの利得パターンである。

実験は、東北大学電子情報システム・応物系ゼミ室で行われた。ゼミ室の大きさや実験装置などの配置は図5に示す。実験環境は図5において、受信アンテナから送信アンテナに向かって1mの位置に75.5cm×76.5cm×0.1cmの金属板を設置した場合を Non Line Of Sight (NLOS)環境とし、

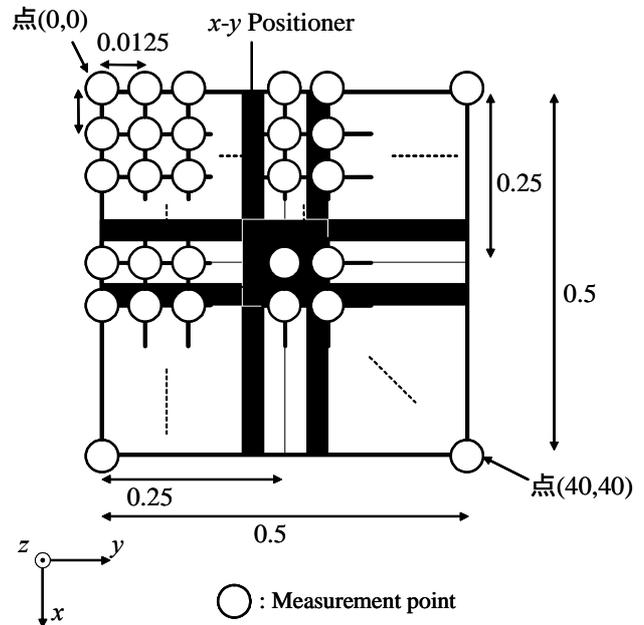


図6 測定点の配置図 [単位: m]

表1 実験諸元

中心周波数 $f$	2.4 GHz
送信電力 $P_T$	0 dBm
変調方式	IEEE 802.11n 64QAM
周波数帯域幅	40 MHz
伝搬環境	屋内(LOS, NLOS)
送受信アンテナ	送受信:半波長ダイポールアレー
アレー素子間隔 $l$	送受信:0.5 $\lambda$
アレー素子間の利得差 $\Delta G$	0dB, 5dB, 10dB, 15dB, 20dB

金属板を設置しない場合を Line Of Sight(LOS)環境とする。そして、実験は送信電力を一定とし、減衰器の減衰値を

0dB から 20dB まで変化させて行う．実験の詳しい諸元は表 1 に示す．図 5 に示す受信アンテナの受信範囲を拡大した図を図 6 に示す．図 6 より，測定範囲は 50cm×50cm，測定間隔は 1.25cm とし，これより測定点数は  $41 \times 41 = 1681$  点となる．

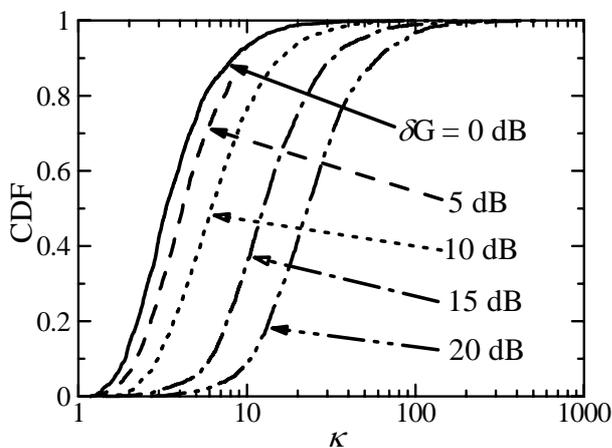
#### 4. 実験結果

$2 \times 2$  MIMO システムの  $\mathbf{H}\mathbf{H}^\dagger$  の固有値は 2 個ある．図 7 において，LOS 環境と NLOS 環境の最大固有値と最小固有値の比  $\kappa$  の累積分布関数(CDF:Cumulative distribution function)を示す．図 8 において，LOS 環境と NLOS 環境の各環境におけるアレー平均受信 SNR の CDF を示す．そして，図 9 において，LOS 環境と NLOS 環境の伝送容量の CDF を示す．

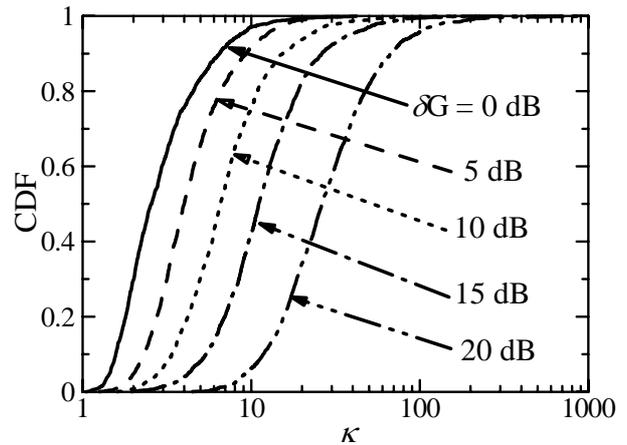
図 7 により， $\kappa$  は LOS 環境において受信アレーアンテナ間の利得差が増加するにしたがって  $\kappa$  の分布は，多少の値の変化はあるものの大きい値で分布している．NLOS 環境においても， $\kappa$  の分布は，LOS 環境と同様にほぼ同様な分布を示している．

図 8 により，まず LOS 環境においては，受信アレー素子間の利得差  $\delta G$  が，10dB 以下ではアレー平均受信 SNR の分布が大きく変化するのだが，10dB 以上増加するとアレー平均受信 SNR の分布にほとんど変化がなくなる．NLOS 環境においても LOS 環境の場合と同様に 10dB 以下ではアレー平均受信 SNR の分布が大きく変化するのだが，10dB 以上増加するとアレー平均受信 SNR の分布にほとんど変化がなくなる．

そして，図 9 より，LOS 環境における伝送容量は，受信アレーアンテナ間の利得差  $\delta G$  が，増加するにしたがって値がより小さいところで分布するようになることが分かる．NLOS 環境においても，LOS 環境と同様に受信アレーアンテナ間の利得差  $\delta G$  の増加にしたがって，より小さい値で分布するようになる．

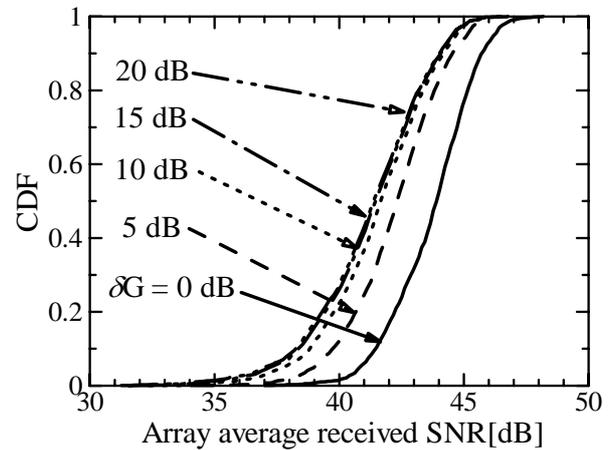


(a) LOS 環境

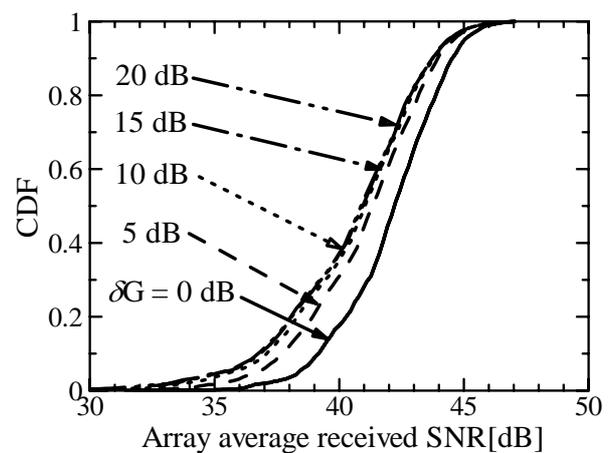


(b) NLOS 環境

図 7  $\kappa$  の CDF

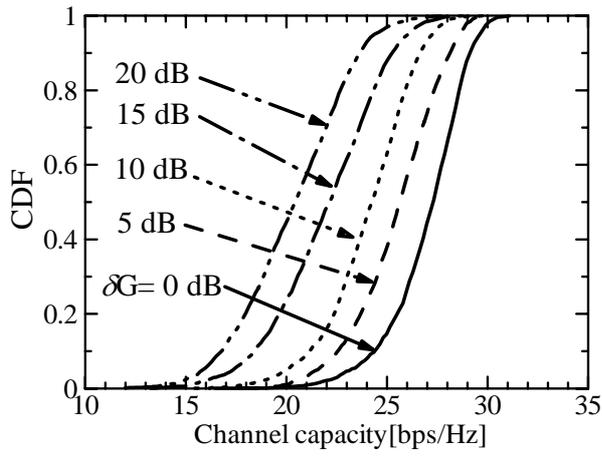


(a) LOS 環境

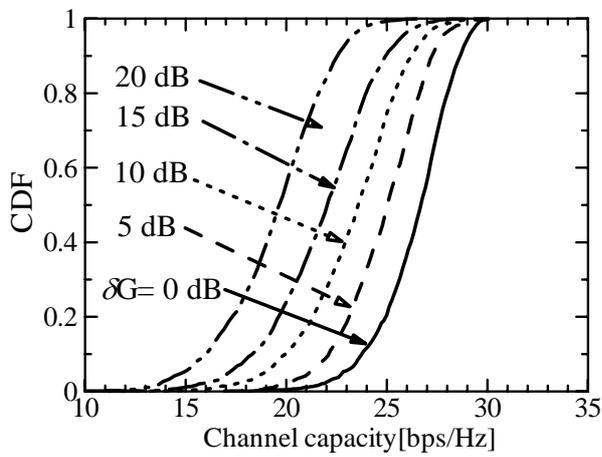


(b) NLOS 環境

図 8 アレー平均受信 SNR の CDF

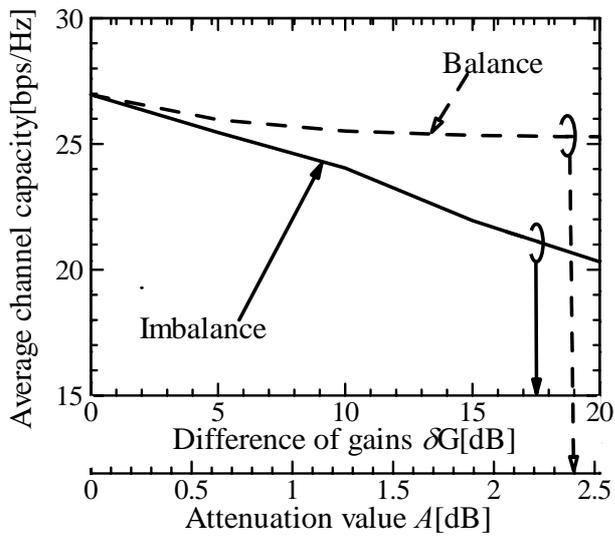


(a) LOS 環境

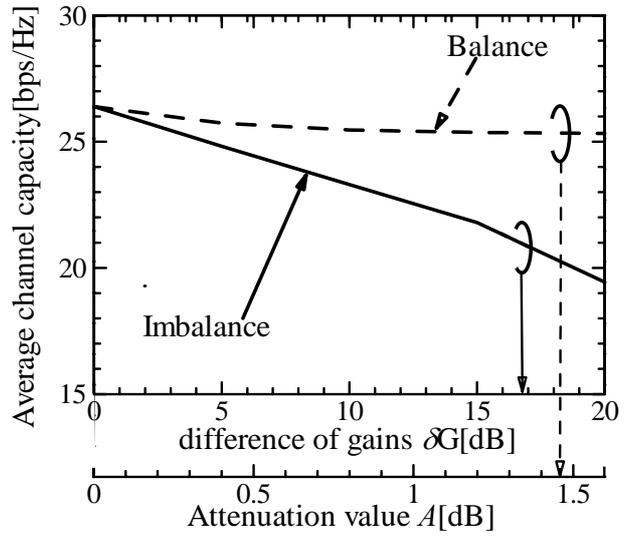


(b) NLOS 環境

図9 伝送容量の CDF

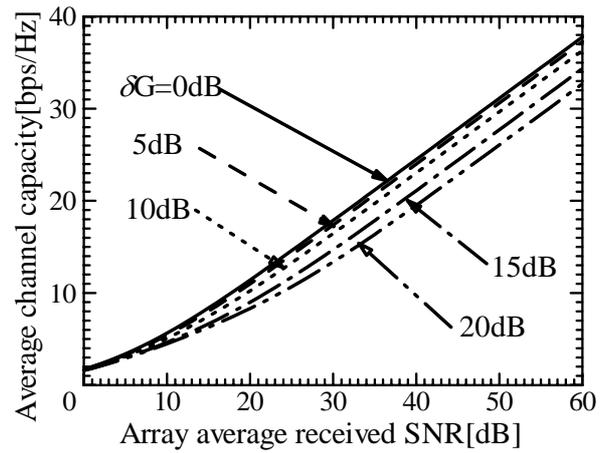


(a) LOS 環境

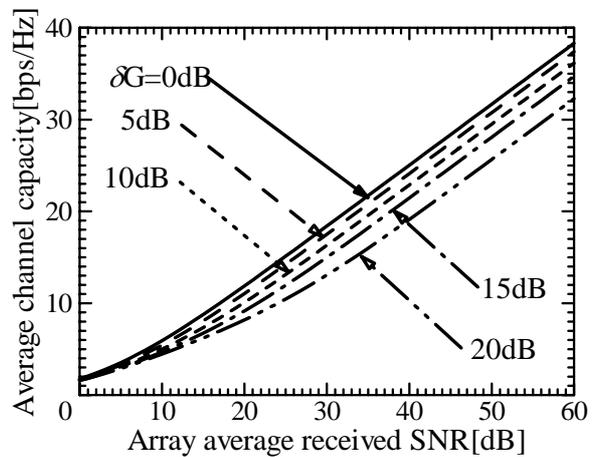


(b) NLOS 環境

図10 減衰値と平均伝送容量の関係



(a) LOS 環境



(b) NLOS 環境

図11 アレー平均受信 SNR と平均伝送容量の関係

次に、減衰値と平均伝送容量の関係を示す。横軸には利得のバランスが取れた場合を示す Balance に対応する減衰値  $A$  の軸と利得のバランスが取れなかった場合を示す Imbalance に対応する利得差  $\delta G$  の軸の 2 つの軸を示す。そして、同じ地点におけるそれぞれの値では、利得のバランスが取れた場合の総受信 SNR と利得のバランスが取れなかった場合の総受信 SNR は等しくなっている。縦軸に伝送容量の平均値を示す。

ここで、利得のバランスが取れなかった場合の Imbalance は、アレー平均受信 SNR と固有値ともに実験の測定値を用いて各測定点の伝送容量を計算し、その伝送容量から全測定点の平均伝送容量を求めている。次に利得のバランスが取れた場合の Balance は、Imbalance の各減衰値における総受信 SNR と同値の総受信 SNR となるように 2 素子のアンテナの受信 SNR の測定値に対して、それぞれのアンテナに同じ減衰をかけて求めた各測定点のアレー平均受信 SNR を用いて各測定点の伝送容量を計算し、最終的には全測定点の平均伝送容量を求めている。そして、 $\kappa$  は、利得のバランスが取れていない場合は実験の測定値を用いて計算を行い、利得のバランスが取れた場合は、減衰値を変化させても利得差がないので、LOS 環境の場合は図 7(a)の、NLOS 環境の場合は図 7(b)の減衰値が 0dB の値を用いている。

図 10(a)の LOS 環境における利得のバランスがとれた場合では、減衰値  $A$  が増加しても平均伝送容量がほとんど変化していない。しかし、利得のバランスが取れていない場合では、利得差  $\delta G$  が大きくなるに従って平均伝送容量はほぼ線形的に減少していることが分かる。次に図 10 (b)より、NLOS 環境では各素子間隔において利得のバランスがとれた場合では減衰値  $A$  が増加しても、平均伝送容量はほとんど変化がなく、利得のバランスがとれていない場合では利得差  $\delta G$  に比例して平均伝送容量はほぼ線形的に減少していく。

最後に、実験により測定した各減衰値の固有値と筆者が任意に与えたアレー平均受信 SNR の変数を用いて計算を行い求めた各環境の平均伝送容量を図 11 に示す。図 11(a)より、LOS 環境では、アレー平均受信 SNR が 0~10dB において平均伝送容量は非線形的に増加するが、受信 SNR が 10dB 以上となると平均伝送容量はアレー平均受信 SNR が増加するとともに線形的に増加する。そして、NLOS 環境においても、LOS 環境と同様にアレー平均受信 SNR が 0~10dB において平均伝送容量は非線形的に増加し、アレー平均受信 SNR が 10dB 以上となると平均伝送容量はアレー平均受信 SNR が増加するとともに線形的に増加していることが分かる。この結果より、アレー平均受信 SNR が 10dB 以下では  $\kappa$  が大きく影響し、アレー平均受信 SNR が 10dB 以上では受信 SNR が大きく影響していると考えられる。

## 5. まとめ

本報告では、2×2 MIMO システムにおいて意図的に 2 つのアンテナの利得のバランスが取れた場合と取れていない場合の 2×2 MIMO 伝送容量について比較検討することによってアレーアンテナの利得のバランスが 2×2 MIMO システムの伝送容量に与える影響について検討を行った。

利得のバランスは取れた場合と利得のバランスは取れていない場合を比較すると、LOS 環境、NLOS 環境ともに、利得のバランスは取れた場合のほうが、利得のバランスは取れていない場合より伝送容量が大きい値を示した。アレー平均受信 SNR と平均伝送容量の関係に関しては、平均伝送容量は、アレー素子間の利得差が 10dB 以下では非線形的に、10dB 以上で線形的に増加することが分かった。

## 参考文献

- [1] 坂口, ティン, 荒木, "MIMO 固有モード通信システムの構築と測定実験結果", 電子情報通信学会論文誌 B Vol.J87-B No.9, pp.1454-1466, 2004
- [2] Yaoqing Yang, Guanghan Xu, Hao Ling, "An Experimental Investigation of Wideband MIMO Channel Characteristics Based on Outdoor Non-LOS Measurements at 1.8 GHz", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol.54, No.11, 2006
- [3] G.J.Foschini, M.J.Gans, "On Limits of Wireless Communication in a Fading Environment when Using Multiple Antennas", Kluwer Academic Publishers, Wireless Personal Communications 6, pp.311-335,1998