

第 509 回伝送工学研究会

MIMO チャネル容量に対するアレーアンテナ
素子の利得不平衡による影響の実験的検討

岩木 孝憲 柿沼 悠 陳 強 澤谷 邦男

東北大学大学院工学研究科

平成 20 年 5 月 26 日

MIMO チャネル容量に対するアンテナ素子の

利得不平衡による影響の実験的検討

岩木 孝憲 柿沼 悠 陳 強 澤谷 邦男
Takanori IWAKI Yu KAKINUMA Qiang CHEN Kunio SAWAYA

東北大学大学院 工学研究科
Graduate School of Engineering, Tohoku University

1. はじめに

近年、各種無線システムの導入やデータ伝送の大容量化が望まれている。それに伴い、周波数利用効率等の観点から複数の送受信アンテナを用いて異なる信号を伝送する Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) 通信が現在注目を集めており、MIMO システムに関して多くの実験的検討が行われている[1-5]。MIMO 通信の通信容量はアンテナの特性を含めた伝搬特性で決定されるため、アンテナの設計を正しく行うことはより高い伝送容量を得るために重要となる。また多くのアンテナを用いるほど MIMO システムの伝送性能は向上し、理想的な伝送環境では MIMO 通信容量は送受信のアンテナの数に対して線形的に増加すると言われている[6], [7]。

一方、携帯用無線端末は小型化の一途を辿っており、小型化・省電力化に対する要求は非常に高く、アンテナの設計に設置の条件等厳しい制限が課されている。従来のシステムにおいては、空間を効率的に利用するため、異なる種類のアンテナを用いることでダイバーシティ利得を得ている。そのため現在、小型アンテナを用いた際の MIMO 性能の理論的実験的検討や、小型化の際アレー素子間隔が MIMO 性能に与える影響に関する検討など、小型アンテナが MIMO 通信容量に与える影響に関する研究が盛んに行われている[8-11]。更には、実用性の面から偏波ダイバーシティを用いたアンテナ設計も提案されている[12], [13]。しかし、これらの研究では、アレーアンテナには同じ種類のアンテナ素子が用いられており、また異なる種類のアンテナ素子を用いたことによる MIMO 伝送特性への

影響は十分評価されていない。そこで本研究では特にアンテナ利得に注目し、アンテナ素子の利得の不平衡が MIMO の通信容量にどのような影響を与えるのかを明らかにする。

本研究では 2×2 MIMO システムにおいて、受信アンテナの利得の不平衡が MIMO 性能に与える影響に関して実験的な評価を行う。まず、利得の不平衡がある場合、MIMO システムの通信性能を評価し、従来のダイバーシティ技術と比較した優位性を示す。次に、利得の等しいアンテナ及び利得の異なるアンテナを用いた場合の MIMO 性能を比較した結果を示し、MIMO 用アンテナに求められる性能について述べる。

2. MIMO 通信容量

全送信電力を P_T とし、送信側で M 本、受信側で N 本のアンテナ素子を用いた $M \times N$ MIMO 通信システムにおいて通信容量は(1)式のように表される[1], [2]。

$$C = \log_2 \left| \mathbf{I}_N + \frac{P_T}{\sigma_n^2 M} \mathbf{H} \mathbf{H}^\dagger \right| \quad (1)$$

ここで \mathbf{I}_N は単位行列、 σ_n^2 は雑音電力、 \mathbf{H} は正規化されたチャネル行列、 \dagger は行列の共役転置を表している。 \mathbf{G} をチャネル行列とすると \mathbf{H} と \mathbf{G} の関係は $\mathbf{H} = \mathbf{A} \mathbf{G}$ と表されるが、ここで \mathbf{A} は以下ようになる。

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

また本研究では MIMO 通信の他にシングルストリームを用いたダイバーシティ技術を考慮に入れ、通信容量に関

してMIMO通信との比較を行った。送信側でM本のアンテナ素子を用いて送信ダイバーシティを行う $M \times 1$ MISO通信システムにおける通信容量 C_{MISO} 、受信側でN本のアンテナ素子を用い受信ダイバーシティを行う $1 \times N$ SIMO通信システムにおける通信容量 C_{SIMO} は以下のように表される。

$$C_{\text{MISO}} = \log_2 \left(1 + \frac{P_T}{\sigma_n^2} \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M |g_i|^2 \right) \quad (3)$$

$$C_{\text{SIMO}} = \log_2 \left(1 + \frac{P_T}{\sigma_n^2} \sum_{i=1}^N |g_i|^2 \right) \quad (4)$$

ここで h_i は送受信間の i 番目のチャネル応答を表している。

3. 測定システム

図 1 に本研究で用いた測定システムを示す。本研究では 2×2 MIMO システムを仮定しており、表 1 に示す条件の下で測定を行った。同期を行った 2 台の Signal Generator (SG) を用いて IEEE.11n の基準に基づいた信号を発生し、半波長ダイポールアンテナからなる 2 素子アレーアンテナから送信を行う。受信側では送信側と同じ 2 素子のダイポールアンテナを用いて信号を受信し、チャネル 2 側のみ減衰器に通した後に、それぞれの受信信号を Vector Signal Analyzer (VSA) を用いて受信を行う。本研究では減衰器を用いて人為的に引き起こすアンテナ利得の低下量を [dB] と定義している。VSA で受信された信号は、ダウンコンバートされた後 AD 変換され IQ 信号を得る。

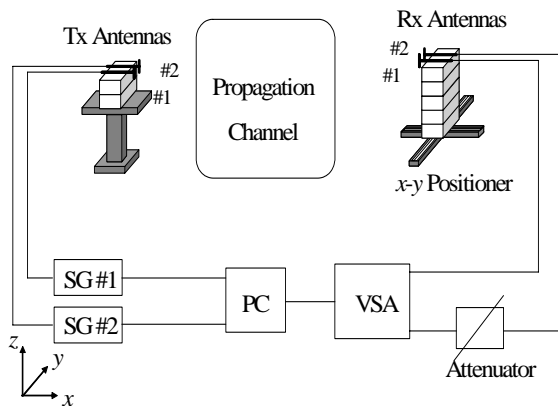


図 1 MIMO 伝送特性測定システム構成図

表 1 測定諸元

中心周波数 f_0	2.4GHz
周波数帯域幅 B	40MHz
アンテナ毎の送信電力 P_t	0dBm
アンテナ素子	半波長ダイポールアンテナ
アレー素子間隔	0.5λ

測定実験は一般的な会議室において行われた。部屋の大きさは $8.3\text{m} \times 6.5\text{m} \times 2.4\text{m}$ である。送受信アンテナは壁面付近に 1.51m の高さに設置し、送受信間隔 $l=6.8\text{m}$ とした。また、SG, VSA, x - y 軸ポジショナは PC と接続されており、測定を制御することが可能である。本研究では、通信容量を統計的に評価するため、受信アンテナは原点を基準として水平面内において $\pm 2\lambda$ の範囲を $\lambda/10$ 間隔で移動させ、計 1681 点で受信を行った。

4. 測定結果

図 2 に送信電力を変化させたときの受信エリア内における平均通信容量を示す。四角の中には平衡状態での平均受信 SN 比 ρ を示す。

送信電力が 0dBm, -15dBm の場合、平均通信容量 αG が増えるに従い線形的に低下した。しかし送信電力が -30dBm の場合、チャネル 2 の受信アンテナがノイズレベル以下に低下してしまったため、 α が大きいところでは通信容量は低下はわずかである。

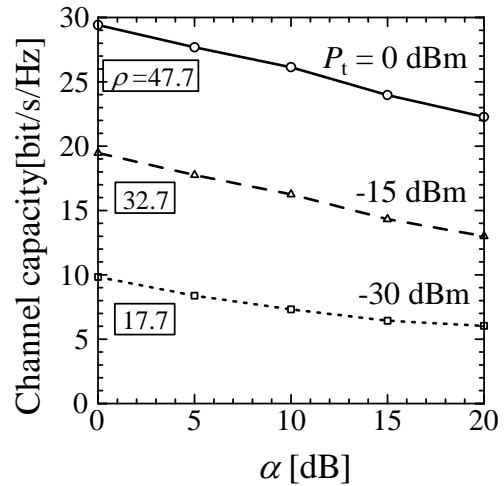
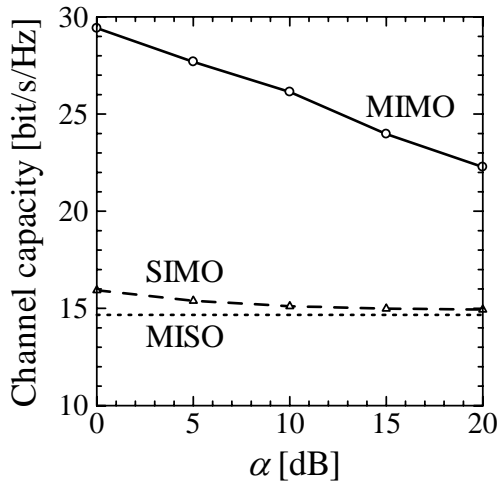


図 2 α の変化に対する平均通信容量

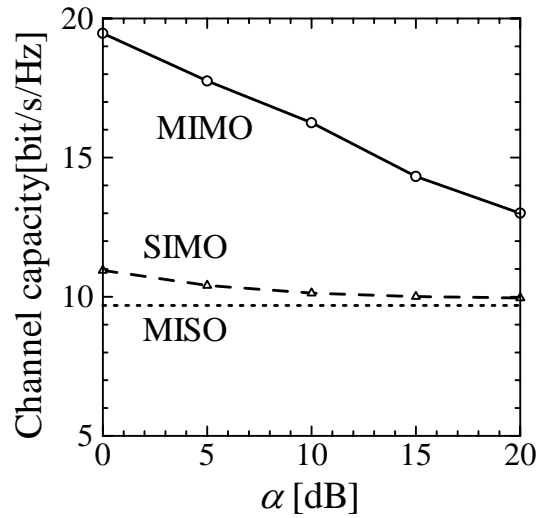
次に、MISO 通信、SIMO 通信との比較を示す。送信電力を図 3(a), (b), (c)にそれぞれ送信電力を 0dBm, -15dBm, -30dBm としたときの結果を示す。送信電力が 0dBm の場合、アンテナの利得が平衡しているとき MIMO 通信による通信容量は他の MISO 通信、SIMO 通信と比較して 85%以上高いことが見てとれる。しかしながら、MIMO 通信の利得のアンバランスによる影響は他の通信方式と比較して大きく、アンバランスが大きくなるに従って両者の差が徐々に小さくなっているのが分かる。

図 3(b)に送信電力を-15dBm とした場合の結果を示す。利得のアンバランスがない場合、MIMO 通信を行った場合、他の SIMO 通信方式や MISO 通信方式を用いた場合に対して 80%以上の通信容量の向上が見られる。しかし、利得のアンバランスが増えるに従い、MIMO 通信容量の低下が著しく、 $\alpha=20\text{dB}$ の点においては、通信容量の向上は 30%程度となる。

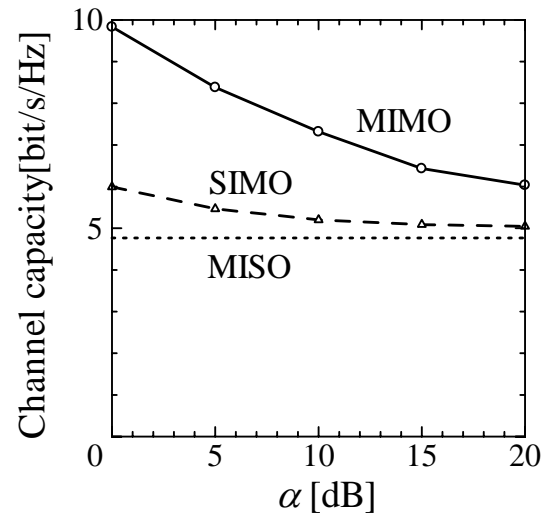
図 3(c)に送信電力を-30dBm とした場合の結果を示す。送信電力を-30dBm とした場合でも、MIMO 通信は MISO 通信方式や SIMO 通信方式と比較して高い通信容量を示しており、利得の不均衡が 20dB と大きい場合に関しても、10%程度の通信容量向上が見られる。



(a) $P_t=0\text{dBm}$ の場合



(b) $P_t=-15\text{dBm}$ の場合



(c) $P_t=-30\text{dBm}$ の場合

図 3 各種空間ダイバーシティ通信方式の比較

次に、受信に利得の等しいアンテナを用いた場合と、利得の高いアンテナと利得の低いアンテナを組み合わせた場合でどちらがどの程度通信容量の点で優れているのかを明らかにするために、利得の等しいアンテナを用いた状態を以下のように定義する。図 4 に両者の定義を示す。 A_1 と A_2 は等しく ($A_1=A_2=A$)、またお互いの送受信電力が等しいという条件 ($P_1=P_2$) を与えることで以下の関係式が導かれる。

$$A = \frac{1 + \alpha}{2} \quad (4)$$

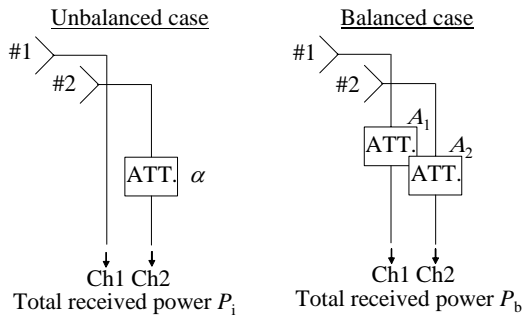


図4 アンテナ利得平衡状態の定義図

図5にアンテナの利得が平衡した場合と片側のアンテナのみの利得が低下した場合の比較を示す。不平衡の場合には線形的に通信容量が低下するのに対し、平衡している場合、通信容量の変化はほとんど見られない。このことから通信容量の線形的低下には利得の不平衡が影響していると考えることができる。またMIMOアンテナの設計を行う場合には特性の良いアンテナを一つ用いるのではなく、なるべく利得が等しいアンテナをアレー化して用いた方が通信容量の観点から見ると望ましいことが分かる。

5. むすび

本研究ではアンテナ素子の利得のアンバランスがMIMO通信容量に与える影響についてVSAを用いて実験的に検討を行った。送信電力が0dBmと-15dBmの場合、アンテナ素子の利得の違いが大きくなるにつれて通信容量は線形的に低下したが、-30dBmの場合受信SN比が低くなったため、 α が大きいところでは通信容量の低下はわずかとなった。また従来のダイバーシティ技術と比較したところ、送信電力が大きく、アンテナの不平衡が小さいほどMIMO通信の優位性が大きく表れたが、送信電力が-30dBm、 α が20dBの場合でも10%程度の通信容量の向上が見られた。次にアンテナ素子の利得が不平衡の場合に対して平衡した場合を定義し両者の比較を行った。利得の不平衡がある場合と比較し、利得の等しいアンテナを用いた場合のほうがより高い通信容量を示すことがわかった。このことから、性能の良いアンテナ素子と性能の悪いアンテナを組み合わせる場合より、利得の等しいアンテナ素子を用いてMIMO用アンテナを設計するほうが好ましいことがわかった。

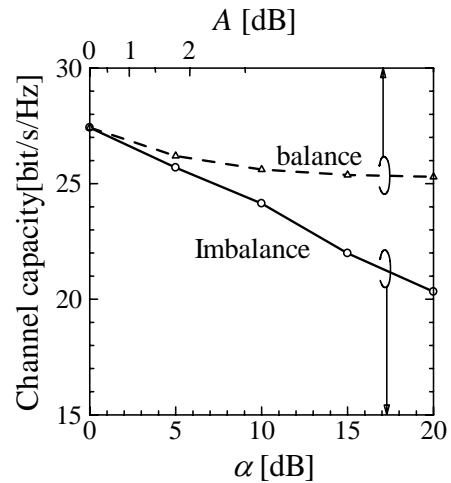


図5 アンテナ素子の利得の平行状態と不平衡状態における通信容量の差の比較

文 献

- [1] Y. Yang, G. Xu, and H. Ling, "An Experimental investigation of Wideband MIMO Channel Characteristics Based on Outdoor Non-LOS Measurements at 1.8GHz", IEEE Trans. AP, vol.54, no. 11, Nov. 2006.
- [2] S. Ting, K. Sakaguchi, and K. Araki, "Performance Analysis of MIMO Eigenmode Transmission System under Realistic Channel and System Conditions", IEICE Trans. Commun., Vol. E87-B, No. 8, pp. 2222-2232, 2004.
- [3] H. Nishimoto, T. Ogawa, T. Nishimura, and T. Ohgane, "MIMO E-SDM Transmission Performance in an Actual Indoor Environment", IEICE Trans. Commun., Vol.E90-B No.6 pp.1474-1486, 2007.
- [4] K. Nishimori, Y. Makise, M. Ida, R. Kudo, and K. Tsunekawa, "Channel Capacity Measurement of 8×2 MIMO Transmission by Antenna Configurations in an Actual Cellular Environment", IEEE Trans. AP, vol. 54, no.11, Nov. 2006.
- [5] S. W. Ellingson, and M. Harun, "Lateral Position Dependence of MIMO Capacity in a Hallway at 2.4GHz", IEEE Trans. AP, vol. 56, no. 2, Feb. 2008.
- [6] G. J. Foschini, "On Limits of Wireless Communications in a Fading Environment when Using Multiple Antennas", Kluwer Academic

Publishers, *Wireless Personal Communications* 6, pp.311-335, 1998.

- [7] I. E. Telatar, "Capacity of multi-antenna Gaussian channels", *Euro. Trans. Telecommun.*, Vol. 10, No.6, pp. 585-595, 1999.
- [8] W. Browne, M. Manteghi, M. P. Fitz, and Y. Rahmat-Samii, "Experiments With Compact Antenna Arrays for MIMO Radio Communications", *IEEE Trans. AP*, vol. 54, no.11, Nov. 2006.
- [9] C. Waldschmidt, and W. Wiesbeck, "Compact Wide-Band Multimode Antennas for MIMO and Diversity", *IEEE Trans. AP*, vol. 52, no. 8, Aug. 2004.
- [10] H. Y. E. Chua, K. Sakaguchi, K. Araki, H. Iwai, T. Sakata, and K. Ogawa, "Theoretical and Experimental Verification of the Effects of Mutual Coupling on a 2×2 MIMO System", *IEICE Technical Report*, WBS2004-118, A•P2004-299, RCS2004-386, MoMu2004-169, MW2004-296, March 2005.
- [11] S. Krusevac, P. Rapajic, and R. Kennedy, "Effect of Mutual Coupling on the Performance of Multielement Antenna Systems", *Proc. ISAP2005*, Aug. 2005.
- [12] N. K. Das, T. Inoue, T. Taniguchi, and Y. Karasawa, "An Experiment on MIMO System having Three Orthogonal Polarization Diversity Branches in Multipath-rich Environment", *IEICE Technical Report*, MW2003-294, Jul. 2004.
- [13] N. Honma, K. Nishimori, Y. Takatori, A. Ohta, and S. Kubota, "Evaluation of Antenna Selection Method Using Orthogonal Polarization and Radiation Patterns for Compact MIMO Antenna", *IEICE Technical Report*, A•P2006-86, Oct. 2006.