

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 16 日現在

機関番号：11201

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25630157

研究課題名(和文)無線通信システム特性改善のためのトランスミットアレーを用いた電波環境操作法

研究課題名(英文)Control of radio propagation environment using transmit-array for improving performance of wireless communication systems

研究代表者

本間 尚樹 (Honma, Naoki)

岩手大学・工学部・准教授

研究者番号：70500718

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：MIMO (Multiple Input Multiple Output)システムは伝搬環境に由来する伝搬損失やキーホール効果によってチャンネル容量が低下する。本研究では、可変トランスミットアレーの利用によって伝搬環境を操作し無線通信システムの伝送特性を改善する方法について検討した。可変素子を装荷した無給電の中継アレーアンテナを伝搬路に配置し、チャンネル容量が改善するように無給電アレーアンテナを制御する。MIMOチャンネルの測定結果より、チャンネル容量の10%値を、2.52 bits/s/Hz改善することを示し、屋内環境の伝搬特性改善に可変トランスミットアレーが有効であることが明らかになった。

研究成果の概要(英文)：Channel capacity of MIMO (Multiple Input Multiple Output) system strongly depends on the characteristics of the propagation environment, e.g. signal attenuation and keyhole effect. This report describes the results of the study on controlling radio propagation environment using transmit-array for improving performance of wireless communication systems. The passive repeater comprising parasitic array antennas loaded by tunable impedance elements is located in the propagation environment and controls the propagation characteristics to enhance the channel capacity. The measurement of MIMO channel was carried out and showed that the 10 % value of MIMO channel capacity can be improved by 2.52 bits/s/Hz in indoor propagation environment, and this well supports the effectiveness of the proposed method.

研究分野：工学

キーワード：MIMO チャンネル容量 トランスミットアレー 電波伝搬

科学研究費助成事業 研究成果報告書

1. 研究開始当初の背景

セルラシステム等多くの無線通信システムはマイクロ波帯の電波を用いている。無線通信システムはフェージング（多重反射波の合成により生ずる強弱）の影響を受けるため、マージンを考慮してシステム設計を行う。また、エリア端（基地局から最も遠い地点）で所望の通信品質を確保できるように設計されるため、悪環境ではエリアサイズを縮小し基地局密度を上げる必要がある。一方、近年複数アンテナを用いアンテナ数倍に伝送特性を向上する MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) 技術が登場し実用に供されている[1]~[2]。しかし、多重反射波が得られない環境では高い伝送容量が得られないという問題がある。特に SNR(信号対雑音比)が高くてても信号の伝搬経路が限定され伝送容量が減少する現象はキーホール効果と呼ばれ、伝送品質向上の障害となっている[3]。

2. 研究の目的

申請者は無給電アンテナを用いたアレーアンテナ指向性制御について研究を行っており[4]~[6]、無給電アンテナ素子を広く配置すると指向性ではなく伝搬チャネル自体が変化するという着想に至った。そこで本研究では、トランスミットアレーと呼ばれる多素子の無給電アンテナアレーを伝搬経路に置くことによって伝搬環境自体を操作する方法について検討を行う。このような手段によって、電波伝搬路の改善効果を実験的に明らかにする。

3. 研究の方法

図1は本提案法の原理を示す概念図である。窓を模した開口のある壁によって区切られた2つの空間を想定しており、開口以外は伝搬経路が存在しない。開口にトランスミットアレーを設置することによって、送信信号はトランスミットアレーを経由し受信アンテナに到達する。印加電圧を制御することによって、受信感度が最適になるようにトランスミットアレーの装荷インピーダンスを与える。電波の伝搬方向を制御することによって、SNR (Signal-to-Noise Ratio) を改善し、電波を拡散することによって空間相関を低下させる。これらの改善効果によって、MIMO チャネル容量の改善を目指す。

図2に本実験で使用するトランスミットアレーアンテナを示す。トランスミットアレーはガラスエポキシ基板上にプリントしたものを使用する。ガラスエポキシ基板の比誘電率と誘電正接はそれぞれ、 $\epsilon_r = 4.2$ 、 $\tan\delta = 0.025$ である。トランスミットアレーを構成する素子は半波長ダイポールアンテナとした。トランスミットアレーのサイズは

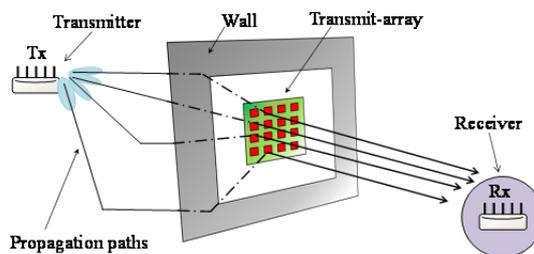


図1. 原理の概念図

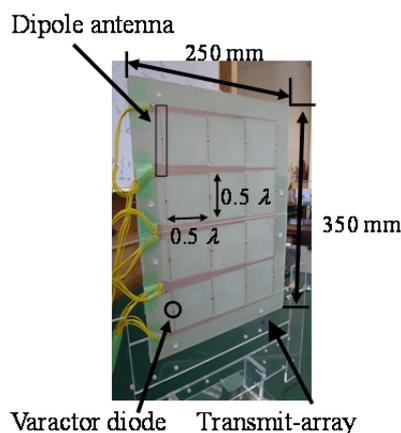


図2. 試作したトランスミットアレー

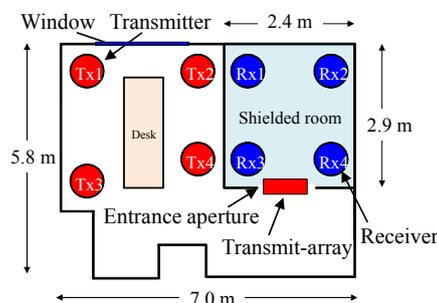


図3. 実験環境の平面図

350 × 250 mm とし、基板の厚さは 1.60 mm とした。また、ダイポールアンテナの素子間隔を半波長とし、素子数を $4 \times 4 = 16$ 素子とした。また、図2のトランスミットアレー上の円は varactor diode (HVU316: Renesas Technology) を示している。全てのダイポール素子の中央に Varactor diode を実装した。また、これら全ての Varactor diode を独立に制御することを可能としている。Varactor diode の負荷リアクタンスの値は -94.8Ω および 8.1Ω の何れかである。このリアクタンスの値は、動作周波数において、30V と 0V の電圧を印加した場合の、varactor diode のインピーダンス値に対応する。MIMO チャネル容量を最大化するために、全てのリアクタンス値の組み合わせから、最適リアクタンス値の組み合わせを選出する。

送受信アンテナとして、2素子の水平オムニアンテナを使用する。オムニアンテナは水平面においてオムニ指向性を実現するために、対称なマイクロストリップアンテナを重ねた構造となっている。中心周波数 2.4 GHz 帯で、反射係数 S_{11} は-15 dB である。使用する周波数帯域幅を2.46 GHz ~ 2.54 GHz とし、取得データ数を 21 ポイントとした。送受信アンテナの素子間隔を半波長とした。

図3に実験環境の平面図を示す。部屋のサイズは $7.0 \times 5.8 \times 2.7 \text{ m}^3$ である。壁はコンクリートである。この部屋の中に金属素材の壁で覆われたシールドルーム設置されている。シールドルームのサイズは $2.4 \times 2.9 \times 2.7 \text{ m}^3$ である。送信アンテナを Tx1, Tx2, Tx3, Tx4 の位置に設置し、受信アンテナを Rx1, Rx2, Rx3, Rx4 の位置に設置することによって、NLOS 環境を実現している。送受信アンテナの壁からの距離を0.5 mとし、アンテナ高を1.0 mとした。トランスミットアレーはシールドルームの開口に設置した。開口面のサイズは $2.0 \times 0.8 \text{ m}^2$ である。また、トランスミットアレーの中心を、床から1.0 mの位置となるように、アンテナ高を設定した。図4(a)にシールドルームの外観を、図4(b)にシールドルームの内部を示す。

図5の(a)~(c)は本実験の電波伝搬環境改善の比較に用いた3通りの開口部の様子を示している。ここで、(a)はシールドルームの開口にトランスミットアレーを設置した場合、(b)はトランスミットアレー無設置の場合、(c)はガラスエポキシ基板を設置した場合をそれぞれ表している。実験ではトランスミットアレーの改善効果を検証するために、トランスミットアレーを設置した場合(a)と無設置の場合(b)を比較する。また、トランスミットアレーをプリントしているガラスエポキシ基板の影響を検討するために、トランスミットアレー無設置の場合(b)とガラスエポキシ基板を設置した場合(c)について比較する。

以上の述べた方法に基づきトランスミットアレーが電波伝搬環境に与える影響、および電波伝搬環境操作の効果について検証した。

4. 研究成果

本研究では、SNR、空間相関および、MIMO チャネル容量を伝搬環境改善の評価要素として用い、これらはそれぞれ、

$$\text{SNR} = \text{Tr}(\mathbf{H}\mathbf{H}^H) \frac{P_t}{N_t \sigma_n^2} \quad (1)$$

$$\rho_{12} = \frac{|h_{21}h_{11}^* + h_{22}h_{12}^*|}{\sqrt{|h_{11}|^2 + |h_{12}|^2} \sqrt{|h_{21}|^2 + |h_{22}|^2}} \quad (2)$$



(a) 外観



(b) 内部

図4.実験に用いたシールドルーム

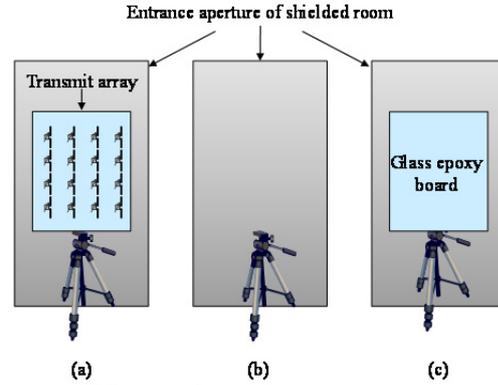


図5. 電波伝搬環境の比較に用いた開口部の配置：
(a)シールドルームの開口にトランスミットアレーを設置した場合、(b)トランスミットアレー無設置の場合、(c)ガラスエポキシ基板を設置した場合

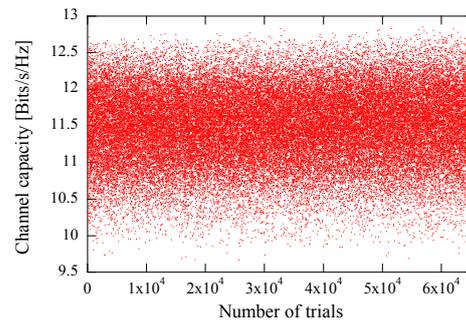


図6.試行回数に対するチャネル容量

$$C = \log_2 \det \left(\mathbf{I} + \frac{P_t}{N_t \sigma_n^2} \mathbf{H}\mathbf{H}^H \right) \quad (3)$$

を使用する。ここで、 P_t は送信電力、 σ_n^2 は雑音電力、 N_t は送信アンテナ数であり、本検討では $N_t = 2$ とした。 \mathbf{H} と \mathbf{I} はそれぞれ、MIMO チャネル行列と単位行列を示している。 h_{ij} ($1 \leq i \leq 2, 1 \leq j \leq 2$)は、 \mathbf{H} の要素である。 \mathbf{I} は単位行列を示している。リアクタンス値の

全組み合わせは、 $2^{16} = 65536$ 通りが存在し、伝搬チャネル \mathbf{H} を、その全てのリアクタンス値の組み合わせについて測定した。Varactor diode のリアクタンスを、NI PCIe-6509 (96-channel digital I/O board: National Instruments) を使用し制御した。

図 6 に試行回数(リアクタンスの組み合わせ)毎のチャネル容量を示す。図 6 より、リアクタンスの組み合わせに応じて、異なる MIMO チャネル容量が得られることが分かる。したがって、リアクタンスの最適な組み合わせを選択することによって、最大チャネル容量が得られることが分かる。

図 7 に、SNR の累積確率分布を示す。図中 (a) は可変トランスミットアレーを設置し最適なリアクタンスの組み合わせを実現した場合、(b) はトランスミットアレーを無設置(ガラスエポキシ基板も無設置)の場合、(c) はガラスエポキシ基板のみ(ダイポール素子が無い場合)を設置した場合の SNR を示している。(b) と (c) を比較すると、SNR の値に変化がないことから、ガラスエポキシ基板の有無は SNR の劣化に関係ないことが分かった。SNR の 50 % 値に着目すると、(a) は (b)、(c) に対して、1.23 dB 高く、特に、10 % 値の改善効果は 1.79 dB となり、より大きな値となった。この結果から、トランスミットアレーは受信感度の低い場所において、SNR を改善することを確認した。

図 8 に、瞬時空間相関の累積確率分布を示す。図中 (a) は可変トランスミットアレーを設置した場合、(b) はトランスミットアレーを無設置とした場合、(c) はガラスエポキシ基板のみを設置した場合の空間相関を示している。(b) と (c) の結果が一致していることから、ガラスエポキシ基板の有無は空間相関の特性に影響を与えないことが分かった。空間相関の 50 % 値において、(a) は (b)、(c) に対して、0.19 低下していることが分かった。また、可変トランスミットアレーを設置することによって、空間相関の 90 % 値が 0.97 から 0.83 へと、0.14 低下することが分かり、MIMO システムにおいて、改善効果があることが分かった。

図 9 に、MIMO チャネル容量の累積確率分布を示す。図中 (a) は可変トランスミットアレーのリアクタンスの組み合わせの最適化を実現した場合、(b) はトランスミットアレー無設置の場合、(c) はガラスエポキシ基板のみを設置した場合のチャネル容量の累積確率分布を示している。(b) と (c) を比較すると、MIMO チャネル容量は、ほぼ同じ値となることが分かる。MIMO チャネル容量の 50 % 値において (a) は (b)、(c) に対して、1.80 bits/s/Hz の改善効果することが分かった。さらに、(a) は MIMO チャネル容量の 10 % 値において、(b)、(c) と比較して 2.52 bits/s/Hz 改善する

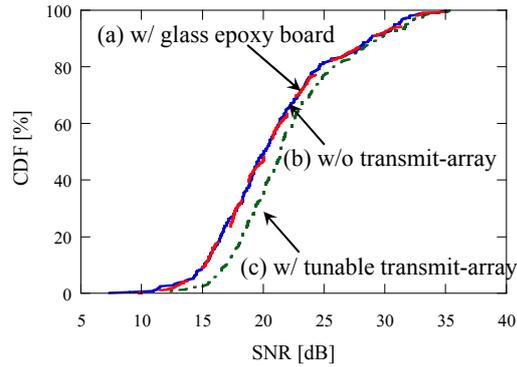


図7.SNRの累積確率分布

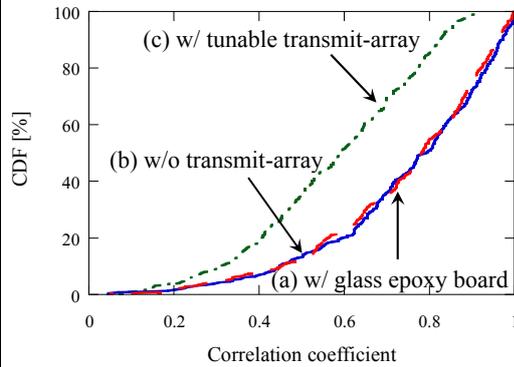


図8.瞬時空間相関の累積確率分布

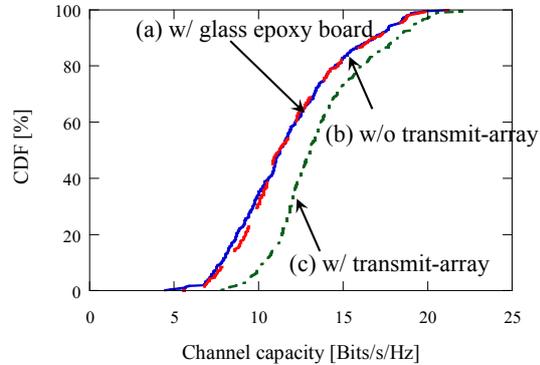


図9.チャネル容量の累積確率分布

ことが分かり、MIMO チャネル容量の 10 % 値を 1.32 倍にできることを明らかにした。この結果より、可変トランスミットアレーを部屋間の開口に設置し、電波伝搬経路を制御することによって、特に通信環境の悪い場所における MIMO チャネル容量の改善効果が大きくなることが分かった。

以上に述べた通り、本研究では、可変トランスミットアレーを用いることによる MIMO チャネル容量改善法について、実験的に評価を行った。実験結果から、可変トランスミットアレーアンテナに装荷したリアクタンスの値を可変とすることで、特に通信環境が悪い場所での MIMO チャネル容量の改善効果が大きくなることを明らかにした。

【参考文献】

- [1] I. E. Telatar, "Capacity of multi-antenna Gaussian channels," Tech.Rep., AT&T-Bell Labs, June.1995.
- [2] Q. H. Spencer and M. Haardt, "Capacity and downlink transmission algorithms for a multi-user MIMO channel," The Thirty-Sixth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, vol.2, pp.1384-1388, Nov. 2002.
- [3] M. Tsuruta, T. Taniguchi, and Y. Karasawa, "On Statistical distribution of eigenvalues of channel correlation matrix in MIMO multi-keyhole environment," IEICE Trans. Commun. Vol.E90-B No.9 pp.2352-2359, Sep. 2007.
- [4] N. Honma, K. Nishimori, R. Kudo, Y. Takatori, T. Hiraguri, and M. Mizoguchi, "A stochastic approach to design MIMO antenna with parasitic elements based on propagation characteristics," IEICE Trans. Commun., Vol.E93-B, No.10, pp.2578-2585, Sep. 2010.
- [5] N. Honma, K. Nishimori, R. Kudo, Y. Takatori, and M. Mizoguchi, "Fast control method of parasitic antennas using non-iterative algorithm in multi-antenna system," IEEE Trans. Antennas and Propagat., Vol.60, No.4, pp.2044-2051, Apr. 2012.
- [6] N. Honma, "Method of MIMO channel estimation between parasitic antenna arrays," IEEE Trans. Antennas and Propagat., Vol. 61, No.05, pp.2792-2800, May 2013.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計1件, 査読有)

- [1] Yuta Takahashi, Naoki Honma, and Yuto Suzuki, "Using a tunable transmit-array antenna to improve the propagation environment," IEEE Antennas Wireless Propag. Lett., Vol. 12,

pp.825-827, Jun. 2013. (DOI: 10.1109/LAWP.2013.2271497)

〔学会発表〕(計10件)

- [1] 石井知貴, 本間尚樹, 恒川佳隆, "映像インピーダンスを用いた近傍界 MIMO アンテナ整合法の実験的評価," 信学技報, AP2014-151, pp.1-6, 2014年12月11日, 東京
- [2] Naoki Honma, Yuta Takahashi and Yoshitaka Tsunekawa, "Manipulating MIMO Propagation Environment Using Tunable Passive Repeater," 2014 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC 2014), TH2B, pp. 504-506, 6 Nov. 2014, 仙台市.
- [3] Naoki Honma, Yuta Takahashi and Yoshitaka Tsunekawa, "Maximizing SNR Using Tunable Passive Repeater: Deterministic Control Method," 2014 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting (AP-S 2014), vol.3, pp.1129-1130, 9 Jul. 2014, Memphis, USA.
- [4] Kazuki Ishii, Naoki Honma and Yoshitaka Tsunekawa, "Matching Method Based on Image Impedances for Near Field MIMO," 2014 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting (AP-S 2014), vol.3, pp.1119-1120, 9 Jul. 2014, Memphis, USA.
- [5] Kentaro Murata, Naoki Honma, Kentaro Nishimori and Hisashi Morishita, "Analog Eigenmode Transmission for 2x2 Short-range MIMO," 2014 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting (AP-S 2014), vol.2, pp. 476-477, 8 Jul. 2014, Memphis, USA.
- [6] Naoki Honma, Yuta Takahashi and Yoshitaka Tsunekawa, "Experimental Evaluation of Tunable Passive Repeater in Indoor Propagation Environment," 2014 Asian Workshop on Antennas and Propagation, P2-24, pp.138, 16 May 2014, 金沢市
- [7] 高橋雄太, 本間尚樹, "可変パッシブリピータにおける SNR 規範の決定論的制御法," 電子情報通信学会総合大会, B-1-213, 2014年3月18日, 新潟市
- [8] 村田健太郎, 本間尚樹, 西森健太郎, 森下久, "近距離 MIMO アナログ固有モード伝送の実験的評価," 電子情報通信学会総合大会, B-1-204, 2014年3月18日, 新潟市
- [9] 高橋雄太, 本間尚樹, "可変トランスミットアレーを用いた MIMO チャネル容量改善法の実験的評価," 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-1-195, 2013年9月18日, 福岡市
- [10] 高橋雄太, 本間尚樹, "可変トランスミットアレーを用いた MIMO チャネル容量改善法の実験的評価," 電気関係学会東北支部

連合大会, 1D-06, 2013 年 8 月 22 日, 会津若松市

[その他]

受賞 : Naoki Honma, Yuta Takahashi, Yoshitaka Tsunekawa, “Manipulating MIMO Propagation Environment Using Tunable Passive Repeater,” 2014 Asia-Pacific Microwave Conference, APMC2014 Prize, Nov. 2014

6. 研究組織

(1) 研究代表者

本間 尚樹 (HONMA NAOKI)

岩手大学・工学部・准教授

研究者番号 : 7 0 5 0 0 7 1 8