

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 10 日現在

機関番号：12101

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560358

研究課題名（和文）MIMO通信容量を最大とする端末用アンテナの理論構築と小形化給電回路の研究

研究課題名（英文）Theoretical study on the feeding network for the compact terminal antenna and its application to the MIMO channel capacity enhancement

研究代表者

鹿子嶋 憲一（KAGOSHIMA KENICHI）

茨城大学・工学部・教授

研究者番号：70292472

研究成果の概要（和文）：MIMO方式における小形端末用アンテナでは、デカップリングマッチング回路の適用が有効であるが、従来その設計法は明確に示されていなかった。本研究ではメッシュ型ネットワークの回路素子を決定する設計式を導出し、相互結合を有する任意のマルチビームアンテナを独立な端子に変換することに成功した。また伝送線路とブリッジサセプタンスから構成する簡易なデカップリング回路の設計式を導出し、従来特殊なアンテナに限定されていたのを適用対象アンテナを拡張することに成功した。さらにマルチビーム端子間で、放射効率、相関係数の周波数特性が異なるとき、アンテナ優劣比較が困難であった。今回アンテナ総合の性能を評価する指標を提案し、アンテナ特性優劣の判断根拠を明確化した。

研究成果の概要（英文）：A decoupling and matching network is very effective for a small terminal antenna used in a MIMO system. However, design formulas for the network elements have not been explicitly reported. We have derived the design formulas for the elements of the mesh network and succeeded in realizing the independent property of the feeding terminals of the multi-beam antenna with mutual couplings. Design formulas for the simple decoupling network composed of transmission lines and bridge susceptances have been generalized to cover the wide range of MIMO antenna. We have also presented to evaluate the MIMO antenna for the frequency characteristics of the radiation efficiencies.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2011年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2012年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：アンテナ工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・通信・ネットワーク工学

キーワード：MIMO方式、アレーアンテナ、相互結合、マッチング、デカップリング、放射効率、相関係数

1. 研究開始当初の背景

(1) 無線 LAN やセルラー方式に MIMO 方式を適応する場合、無線端末用アンテナの実現が課題となる。無線端末においては、アンテナ設置スペースには制限がある。また MIMO による通信容量増加のためにアンテナ数を増やすと、必然的に素子間隔が狭くなり、素子間相互結合が増加し、整合特性の劣化、他素子への電力漏れ込みによる放射効率の低下を招く。さらに端子間の受信信号の相関係数（これは送信時指向性をもとに評価できる）が上昇し、素子間隔が半波長程度のとき得られる MIMO 方式通信容量を実現できなくなる。これに対し、散乱行列 (S マトリックス) を用いたマルチポート回路における整合回路解析の研究が発表され、無損失回路による整合が可能であり、素子間隔が約 0.1 波長に狭くなっても 0.5 波長のときと同程度の受信電力（送信では放射効率に相当）、相関係数が得られることが示された。しかし、整合回路の回路素子を具体的にどのように設計するか、その設計法、設計式は示されていない。また整合特性と端子間結合抑圧の関係についても具体的証明はなされていない。

(2) 一方実用的な給電回路として、伝送線路と端子間を結ぶ線路間にサセプタンスを挿入することによりアンテナ端子間結合を“0”にできることが発表されていたが、アンテナ素子が同じアンテナ入力端では反射がない、素子数 2 の制限が課されており、実際の回路設計上の課題となっていた。

(3) さらに、整合回路を挿入することにより放射効率や相関係数は、中心周波数においては理想特性を実現できるが、中心周波数からずれると、一般には整合回路の端子によって特性が異なり、広い特性を有する端子と狭い特性の端子が存在する。このときアンテナ全体としてはどの特性が優れているか評価する方法や指標がなく、設計目標を設定するのが困難であった。

2. 研究の目的

(1) 任意のアレーアンテナ（複数素子からなるアンテナ系）とこれと同数の送受信機間を完全に整合させ、かつ給電回路間入出力端子間の結合を 0 とする整合回路の設計法を確立する。特に回路素子値の決定法を導出する。さらにこの整合回路の特性解析を通し、整合の有効性を明らかにする。

(2) (1) は、メッシュ形の回路構成を想定したものであるが、特にアンテナ素子数が増えると回路構成が複雑となる。この対処法として、伝送線路とブリッジサセプタンスを用いた簡易構成整合回路の一般化設計法を確立

する。

(3) 端子間で放射効率、相関係数の周波数特性が異なるとき、整合回路全体を統合した特性の優劣比較を可能とする方法、指標を提案する。

3. 研究の方法

相互結合を考慮したアレーアンテナの理論、マルチポート整合回路の理論を踏まえ、アンテナの数値解析に関してはアンテナ解析ソフトウェアを活用する。また基本的な構造(2素子の場合)の試作実験を行い、実現性の確認、実用性の見通しを得る。

4. 研究成果

(1) 任意のアレーアンテナの整合回路

① 整合条件の導出

(i) 図 1 に N 素子アレーと N×N 端子デカップリングマッチング給電回路 (Decoupling and matching feeding network, 以下 DMFN と呼ぶ) の構成図を示す。図 1 において、受信アンテナとして動作するとき、最も右側の電流電源 I_{oi} ($i=1,2,\dots,N$) は取り除く。またアンテナには平面波が入射するので、これによりアンテナ給電端子には電圧が発生し、受信時における等価回路に示すように表わすことができる。図 1 の電圧電源 E_i ($i=1,2,\dots,N$) は、すべての端子と開放したときの電圧であり、モーメント法により精度よく求めることができる。図 1 はアンテナ及び DMFN の基本等価回路であり、送信時、受信時を明確に区別して表現している。

(ii) 図 1 における各部の電圧、電流及びアンテナアドミタンス、整合回路のアドミタンスの間の関係を求め、これを解くことにより、整合回路 Y_M の要素は図 2 の各式で与えられることを導出した。

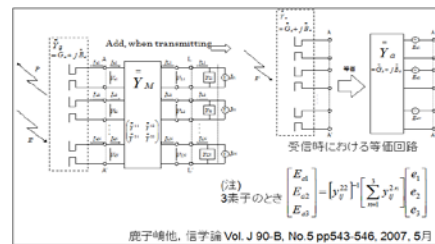


図 1 N×N 整合回路を用いた N 素子アレーアンテナ

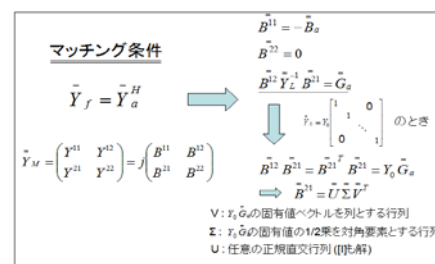


図 2 アンテナ、給電回路のマッチング条件とその解

② 端子間結合抑圧と指向性直交性の証明
 (i) 図 2 のマッチング条件が成り立つとき、図 3 に示すようにマッチング回路の終端負荷側の端子は互いに独立となる（結合しない）ことを証明した。すなわちアンテナと終端負荷間を整合させる回路は、同時に終端負荷端子間を完全にデカップリングすることを式により直接的に示すことができた。

$$B^{12} \bar{Y}_L^{-1} B^{21} = \bar{G}_a \text{ のとき}$$

$$V_L = \frac{1}{2} (Y_L)^{-1} (I_{0i}) \text{ ----- デカップリング条件}$$

$$V_{0i} \cdot I_{0j} = \begin{cases} P_i & (i=j \text{ のとき}) \quad (I_{0i} = 1[A], Y_0 = 0.02[S] \text{ のとき } P_i = 12.5[W]) \\ 0 & (i \neq j \text{ のとき}) \text{ ----- ビーム直交条件} \end{cases}$$

図 3 アンテナ，給電回路解析（デカップリングの証明）

(ii) またこのとき整合回路の各端子から給電したときのアレーアンテナの指向性は、互いに直交することを証明した。このことは図 4 のように説明することができる。このときの各端子指向性を固有モード指向性と呼ぶ。

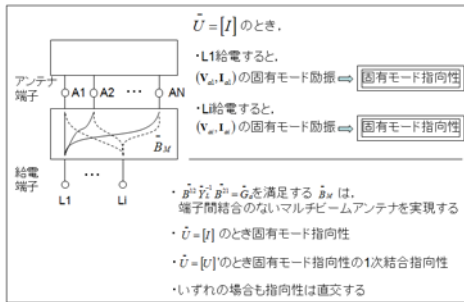


図 4 固有モード励振の例示

③ 数値解析

(i) 例として 4 素子のときのアンテナ構成と、固有モード指向性を図 5 に、放射効率の周波数特性を図 6 に示す。

(ii) 各端子(L1~L4)から給電したときの、各アレー素子の励振電圧(A1~A4)を調べてみると、L1, L2, L3 までの給電のときは、各素子がほぼ均等な電圧で励振されるのに対し、L4 給電のときは、2つの素子が約 10 倍高い電圧で励振されることになり、L4 端子給電のときの放射効率の周波数特性が他の端子給電のときの放射効率に比べ、極めて狭帯域となる原因となることを示していることがわかった。

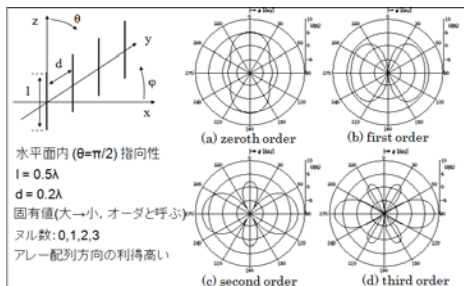


図 5 4 素子直線配列アレーアンテナの固有モード指向性

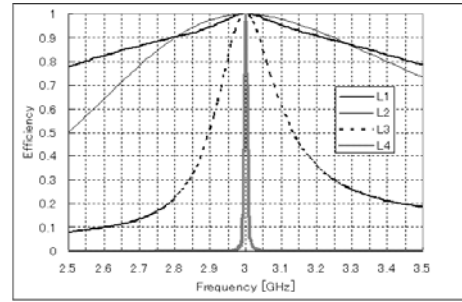


図 6 固有モード励振時における効率の周波数特性

④ 端負荷が異なるときの設計法の拡張

(i) 図 6 に示したように、アレー素子を固有モード励振すると、特定の給電端子の放射効率が極端に狭帯域となる。狭帯域となったビームの等価的な放射コンダクタンスは、広い帯域を有するビームの等価放射コンダクタンスに比べ、非常に小さいことがわかった。そこで、整合回路の負荷端子の負荷を従来 $Y_0 = 1/Z_0 (Z_0 = 50 \Omega)$ 均一としていたものを、各ビームの等価コンダクタンスに合わせて整合をとることができる設計式を導出した。さらに各端子を固有指向性とするのではなく、すべての端子がすべての固有指向性の線形結合となる設計法を考案した。これは素子励振電圧を決めるユニタリ行列を適当に決めることにより実現できる。

(ii) 図 7 に 2 素子のとき、ユニタリ行列の決定法(θ を変える)により、端子放射効率がどのように変化するかを解析した結果を示す。 $\theta = 30^\circ$ とすることで、2つの端子の放射効率を等しくできることが理解できる。

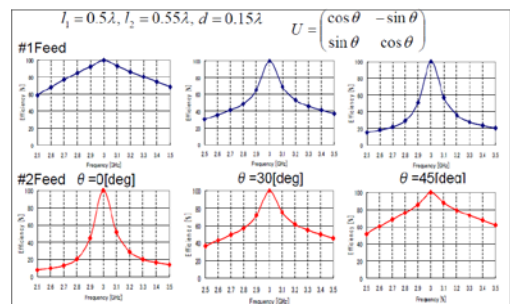


図 7 ユニタリ行列による周波数特性の調整

⑤ 試作と測定結果

(i) 以上の設計法，設計式に基づけて回路を試作し，放射効率，相関係数を測定した。図 8 は試作アンテナ及び整合回路である。アンテナ素子間隔は 0.1 波長で，本来大きな相互結合が存在していたのに対し，S21 の測定結果から相互結合が十分に抑圧できていることを確認した。素子損失等により約 80% の放射効率となった。なお図 8 の整合回路の寸法は 10mm × 10mm で十分小さい。

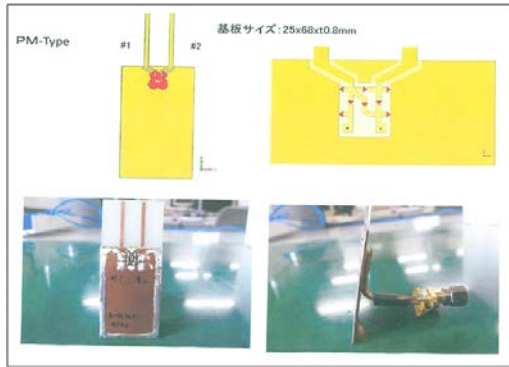


図8 DMFN 試作結果

(2)

伝送線路とブリッジサセプタンスによる簡易なデカップリング回路

① カップリング回路と整合回路の構造

(i)(1)に述べた回路に対し、図9に示す簡易構成のデカップリング回路が発表されていた。しかし、このデカップリング回路の設計に際しては、(a)2素子であること、(b)2つの素子は等しいこと、(c)各アンテナ端子では反射($S_{11}=S_{22}=0$)がないこと、を条件として設計されていた。このためより柔軟性のある設計法を確立することが必要であった。

(ii)図9にデカップリング回路及び整合回路(MC)の構成と挿入位置を示す。ここで整合回路は、デカップリング回路により端子間結合が完全に抑圧されているので、単一素子の場合の整合に用いる、例えばL型整合回路を用いることができる。アンテナ端子及びデカップリング回路端子における電圧、電流は図9に示す通りに与えている。

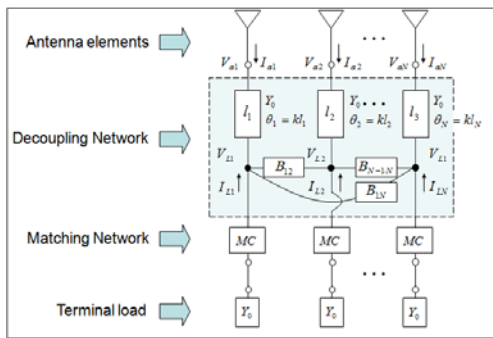


図9 伝送線路とブリッジサセプタンスによるデカップリング回路

② カップリング回路の設計

(i)図9に示したデカップリング回路の各端子における電圧、電流は、図10のように与えられる。これとアンテナ入力アドミタンスを組み込んだ時のデカップリング回路の終端負荷端子側からアンテナ方向を見込んだ入力アドミタンス行列 A の非対角要素がすべて0であれば、各端子間の結合は0となり、完全なデカップリングが実現できる。

(ii)Aの非対角要素が0であるという条件を課すことにより、線路長 $kli = \theta_i$ 、ブリッジサセプタンス B_{ij} を決定することができる。図11は3素子のときの $\theta_i (i=1, \sim 3)$ $B_{ij} (i=1 \sim 3, j=1 \sim 3)$ の決定式である。

$$\begin{bmatrix} \bar{Y}_{a1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -j\frac{Y_0}{\tan\theta_1} & 0 & 0 & 0 & \frac{jY_0}{\sin\theta_1} & 0 \\ 0 & -j\frac{Y_0}{\tan\theta_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & \ddots & 0 & \ddots \\ 0 & 0 & 0 & -j\frac{Y_0}{\tan\theta_N} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{jY_0}{\sin\theta_N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{a1} \\ V_{a2} \\ \vdots \\ V_{aN} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \\ \vdots \\ I_{aN} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{Y}_{L1} \\ \bar{Y}_{L2} \\ \vdots \\ \bar{Y}_{LN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Y}_{a1} \\ \bar{Y}_{a2} \\ \vdots \\ \bar{Y}_{aN} \end{bmatrix} \quad (1)$$

図10 デカップリング回路のアドミタンス行列

$\text{Re}\{a_{ij}(\theta_1, \theta_2, \theta_3)\} = 0 \quad (i=1 \sim 3)$
 $\text{Im}\{a_{ij}(\theta_1, \theta_2, \theta_3)\} = 0 \quad (j=1 \sim 3)$
 $f_1(\theta_1, \theta_2, \theta_3) = 0$
 $f_2(\theta_1, \theta_2, \theta_3) = 0$
 $f_3(\theta_1, \theta_2, \theta_3) = 0$
 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ are solved.
 B_{ij} 's are determined.

図11 3素子のときの素子値決定式

③ 数値計算例

(i)図12に2素子のときの計算例を示す。素子寸法が異なっても、Aの非対角要素は対角要素に比べ十分小さくなっており、デカップリングが実現できていることがわかる。またこのときの各端子給電時の放射指向性は、(1)の完全メッシュ型のデカップリング整合回路のときと同様の指向性が得られており、指向性の直交性も実現できていることが理解できる。

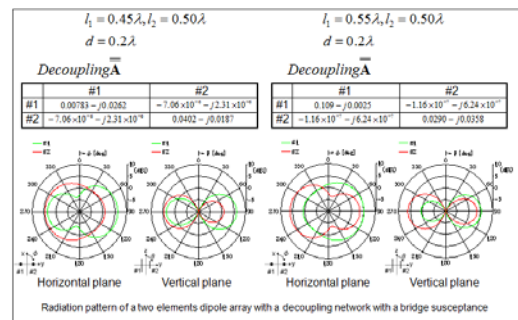


図12 2素子のときのデカップリング特性とそのときの端子指向性

(ii)図13は3素子のときのアンテナ構成と放射効率の周波数特性である。3素子のときも中心周波数では放射効率は1.0となるが、中央素子の放射効率は両端の素子の効率が比較的広帯域であるのに比べ、極めて狭帯域と

なることがわかる。これは(1)で述べた固有モード指向性のことと関連しており、(1)の完全メッシュ型では回路決定パラメータに自由度があり、3つの端子の周波数特性を同等になるよう設計できるのに対し、ブリッジサセプタンス型のデカップリング回路は、構成が簡易である一方、この点が欠点とも言える。(iii)周波数特性の改善のためアンテナ素子を三角形配置とすることによる効果を検証した。アンテナ構成及び放射効率の周波数特性を図14に示す。構造的には立体的になるため図13の場合に比べ不利と言えるが、放射効率の特性改善の1つの候補であると言える。(この成果については、遠藤直之、鹿子嶋憲一、武田茂樹「ブリッジサセプタンスと伝送線路を組み合わせた3素子MIMOアンテナ用簡易デカップリング回路の設計」を電子情報通信学会に投稿し、条件付採録となり査読継続中である)

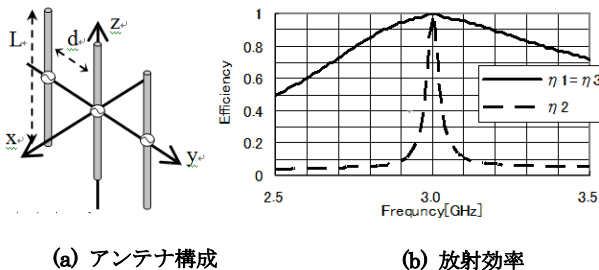


図13 3素子(直線配列)のときのアンテナ構成と放射効率

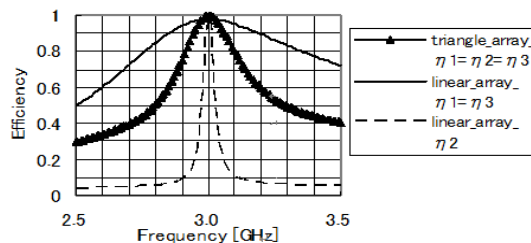


図14 3素子(三角形配列)のときのアンテナ構成と放射効率

(3)MIMO アンテナの評価指標の提案

①問題提起

(i)(1)の完全メッシュ型のデカップリングマッチング回路の設計においては、図15に示すように、2つの給電端子における放射効率は一般的には一致しない。すなわちユニタリ行列の要素を決めるパラメータ「 α 」によって、給電端子#1の周波数特性が#2の特性より広帯域となる場合や、両者が等しくなったり(但し先の#1より狭くなる)、或いは逆に#2が広帯域になることもある。

(ii)MIMO アンテナの性能評価は通常通信容量で評価され、この通信容量はアンテナの放射効率を端子間の相関係数に依存する。アン

テナの性能評価においては周波数特性の優劣が重要であり、対象となる周波数範囲において通信容量を求めることは数値解析においてさえ多くの作業が必要となる。さらに直観的な指標があれば、アンテナの構造を考案する上でも有利となる。

(iii)そこで(i)のような場合、回路設計パラメータ「 α 」をどのように設計すべきかを判断する指標を確立することが必要となる。すなわち各端子の特性が種々変化するとき、アンテナ全体としてどれが優れているのかを判定する指標が必要である。

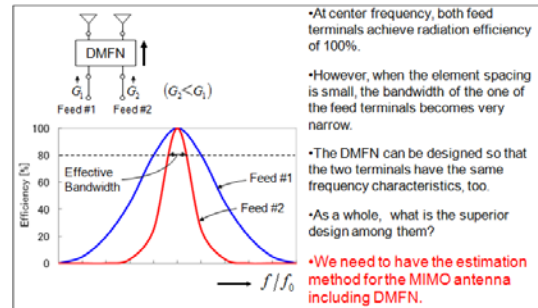


図15 MIMO アンテナ各端子の放射効率周波数特性と特性評価課題

②放射電力行列と実効総放射電力

(i)MIMO アンテナの特性を決定するのは2つの端子から同時に給電したとき、全体として空間に放射される電力の総量で決まると考えられる。この総放射電力を端子効率と端子間相関係数を用いる行列表示を導出した

(ii)この放射電力行列の要素の性質をもとに、実効総放射電力 η_{eff} を導出した。

③通信容量と実効放射効率

(i)MIMO アンテナは元々通信容量に基づいてその特性が評価される。通信容量を求める式から、いくつかの仮定のもとに実効放射効率 η_{eff} を求める表示式を導出した。

④ 数値計算

(i)同様に「 α 」をパラメータとして、 η_{eff} の周波数特性を求めた。

(ii)この特性をもとに、「 α 」をパラメータとし、実効放射効率が80%以上となる周波数比帯域(%)を求めたのが図16である。これより η_{eff} は、 α が小さい部分で η_{eff} より大きくなっており、 $\alpha=0$ 度で5.8%、45度で5.2%である。わずかではあるが $\alpha=0$ 度とするのが有利と言える。一方 η_{eff} は α による違いは η_{eff} の場合より小さく、 $\alpha=0\sim 45$ 度の範囲で約0.2%となっている。

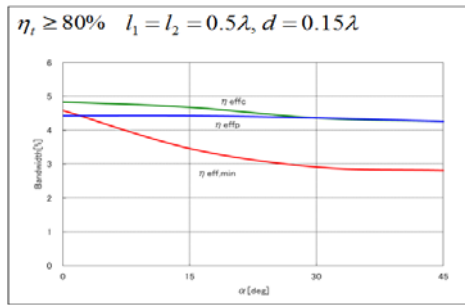


図 16 実効放射効率と帯域幅の関係

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)

- ① 西村一輝, 金澤潤, 鹿子嶋憲一, 武田茂樹, 「近接配置基地局アレーアンテナの相互結合抑圧法」, 学会論文誌 Vol. J95-B No.11 pp1594-1598 2012 年 11 月, 査読有

[学会発表] (計 12 件)

- ① 武田茂樹, 鹿子嶋憲一, 「MIMOデカップリング回路の設計法」, 電子情報通信学会技術研究報告 Vol.112 No.491 AP2012-171 pp41-46 2013 年 3 月, 査読無
- ② Kenichi Kagoshima, Shigeki Takeda, Kazuki Nishimura and Kouhei Itou, “Proposal of the Performance Evaluation Method for a MIMO Antenna”, 2012 IEEE International Conference on Wireless Information Technology and Systems in Hawaii, Nov. 2012, 査読有
- ③ 鹿子嶋憲一, 武田茂樹, 西村一輝, 伊藤耕平, 「マルチビームアンテナの総受信電力と MIMO 通信容量に関する考察」, 電子情報通信学会技術研究報告 Vol.111 No.487 AP2011-205 pp37-42 2012 年 3 月, 査読無
- ④ Kenichi Kagoshima, Shigeki Takeda, Atsuhiko Kagaya and Kazuki Nishimura, “Enhancement of the Frequency Characteristics of a Decoupling and Matching Feeding Network for a MIMO Antenna”, IEEE-APS Topical Conference on Antenna and Propagation in Wireless Communications, in Torino, Sept. 2011 査読有
- ⑤ 遠藤直之, 鹿子嶋憲一, 武田茂樹, 加賀屋谷篤大, 西村一輝, 「ブリッジサセプタンスと伝送線路を組み合わせた MIMO アンテナ用簡易デカップリング回路」, 電子情報通信学会技術研究報告 Vol.110

No.446 AP2010-181 pp43-48 2011 年 3 月, 査読無

- ⑥ Kenichi Kagoshima, Shigeki Obote, Atsuhiko Kagaya, “An Array Antenna for MIMO Systems with a Decoupling Network Using Bridge Susceptances,” Wireless ViTAE 2011, in Chennai, India March 2011, 査読有
- ⑦ Atsuhiko Kagaya, Kenichi Kagoshima, and Shigeki Obote, “Frequency characteristic analysis of the efficiency of a MIMO array antenna with a matching circuit,” 2010 International Symposium on antennas and propagation, pp. 471-474, Nov. 2010. 査読有
- ⑧ Kenichi Kagoshima, Atsuhiko Kagaya, and Shigeki Obote, “Investigations on Decoupling and Matching Feeding Networks for a MIMO Array Antenna,” ICEAA 2010, pp. 341-344, Sept, 2010. 査読有
- ⑨ Kenichi Kagoshima, Atsuhiko Kagaya, and Shigeki Obote, “Radiation and reception properties of a MIMO antenna system with a decoupling and matching feeding network,” 2010 International conference on wireless information technology and systems, August 2010. 査読有
- ⑩ 鹿子嶋憲一, 尾保手茂樹, 加賀屋谷篤大, 「小形アレーアンテナの性能限界と MIMO 方式への効果的適用設計法について」, 電子情報通信学会技術研究報告 Vol.110 No.135 AP2010-61 pp133-138 2010 年 7 月, 査読無

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鹿子嶋 憲一 (KAGOSHIMA KENICHI)
茨城大学・工学部・教授
研究者番号: 70292472

(2) 研究分担者

武田 茂樹 (TAKEDA SHIGEKI)
茨城大学・工学部・准教授
研究者番号: 50323209