

論文

放射パターン測定に基づく アレーアンテナ素子間結合特性 —空間相関とアレー素子間結合を考慮した MIMO 伝送特性評価のために—

大 島 一 郎* 佐々木克守* 中 田 幸 男*
高 橋 行 隆* 唐 沢 好 男**

本研究は、小型端末を想定した場合の「空間相関と素子間結合が MIMO 伝送^{*1}特性に与える影響」を、定量的に把握することを目的としている。定量的な評価を行うためには、アンテナの相互結合特性を、正確に知る必要がある。本稿では、4 素子の半波長スリーブアンテナを例に、放射パターン測定に基づいた素子間結合特性の測定法を述べ、得られた相互結合行列の数値データを示す。

なお、本稿は「大島一郎、佐々木克守、中田幸男、高橋行隆、唐沢好男；「空間相関とアレー素子間結合を考慮した MIMO 伝送特性 [I]」，信学技報，AP2007-103，PP.7-12，2007.11」の一部を改編して転載したものである (copyright©2007 IEICE)。

1. はじめに

送受信の双方でアレーアンテナを用いる MIMO システムは、マルチパス環境においてマルチストリーム伝送^{*2}を可能とするため、高いチャネル容量^{*3}を実現できるシステムとして、様々なワイヤレス通信への適用が期待されている。そのひとつとして、セルラー移動通信^{*4}への応用も検討されているが、移動端末のようなスペースに制約がある場合には、アレー素子間隔が十分にとれず、電波伝搬的にはブランチ間の相関(空間相関)として、アンテナ的には素子間の相互結合として、それらの影響が現れる。そのため、実用システムの性能評価においては、その2つの影響を定量的に把握する必要がある。

伝搬的要因である空間相関については、到来角度分布とアンテナ間隔の関係で、その性質を理論的に把握す

ることが可能であるが⁽¹⁾、そして、当然ながら、相関の影響が伝送特性の劣化(例えば、チャネル容量の低下)として現れることは自明であるが、相互結合の影響が MIMO の特性に与える影響については、アンテナと伝搬の複合現象として現れるため、その評価が難しい。そのため、この問題に対しては、実験的に、あるいは理論的に、種々の研究が行われているが、相互結合の影響が性能を劣化する働きになるという報告⁽²⁾⁽³⁾やその逆の報告⁽⁴⁾⁽⁵⁾などが有り、伝送特性に与える影響について、体系的に整理された結論がまだ出ていない。

アレーアンテナの相互結合特性についての研究の歴史は古く、その影響が問題となるアダプティブアレー^{*5}や到来方向推定への補正技術としての研究が盛んである^{(6)~(9)}。しかし、MIMO のチャネル容量特性など、伝送特性評価の視点での伝搬特性と相互結合特性の相互作用としての研究は、上述のように、まだ十分ではない。また、この検討を行うには、対象とするアレーアンテナについて、信頼性の高い相互結合行列を必要とするが、筆者らの調べた範囲では、その検討に十分な精度で、かつ、使いやすい形で、数値データが提示されている文献がない。

本研究は、アレー間隔を狭めた場合の、空間相関特性とアンテナ相互結合の相互作用が MIMO 伝送特性に与える影響を、定量的に明らかにすることを目的としている。その第一歩として、本稿では、その評価に必要なア

*1 MIMO 伝送：送受信双方に複数のアンテナを用いた伝送方式。複数のデータを同じ時間に同じ周波数を用いて伝送することができる。

*2 マルチストリーム伝送：複数の異なった情報を同時に送信する伝送方式

*3 チャネル容量：1 秒間、1Hz あたりに送信することができるビット数

*4 セルラー移動通信：サービス対象の広い地域をセルと呼ばれる細かい地域に分割し、多くの基地局を設置して、周波数を有効に使う無線方式

*技術開発統括部 電気通信開発部

**電気通信大学先端ワイヤレスコミュニケーション研究センター

*5 アダプティブアレー：複数のアンテナ素子を配列したアレーアンテナを用い、各アンテナの重み付けを伝搬環境に応じて変化させ、指向性を制御する方式

レーアンテナの高精度な相互結合行列を、実験的方法によって取得する方法を述べる。具体的には、4素子の半波長スリーブアンテナを例に、アンテナパターンを測定して、その最小二乗誤差規範で相互結合行列を得る方法を述べ、0.125λから1.5λまでアンテナ間隔を変化させた場合の相互結合行列の測定結果を示す。

2. MIMO 伝送特性の表現

アレーアンテナの素子間隔が十分に大きい場合には、アレー素子で受信した各々の信号がそのままアンテナブランチに現れるが、素子間隔が小さくなると、受信素子に誘起された電流からの再放射が他の素子に作用し、受信特性が変化する。この現象は、アンテナ相互結合効果と呼ばれている。

アンテナ相互結合効果は、送信アレーと受信アレーの双方で発生するが、通常は、アンテナ配置エリアに十分なスペースがとれない端末側にその影響が現れる(図1)。送信信号(送信アレー各素子に入力される信号)ベクトルを s 、受信信号(受信アレー各素子から出力される信号)ベクトルを r 、受信信号に含まれる雑音(熱雑音)ベクトルを n 、アンテナ特性を含めた MIMO 実効チャネル特性を A_e とすると、受信信号は次式で表現できる。

$$r = A_e s + n \quad (1)$$

シャノンのチャネル容量定理より、このチャネルでは、理論上の最大値として、次式で与えられるチャネル容量 C を持つ(アレー各素子からの送信電力を等しいとした場合の式)。

$$C = \log_2 \left[\det \left(I + \frac{\gamma}{N_t} A_e A_e^H \right) \right] \quad (\text{bps/Hz}) \quad (2)$$

ここで、 γ は単一アンテナ対向(SISO)での平均 SN 比である。また、 A_e^H は A_e に対する複素共役転置を表す。以下、相互結合の影響の把握に主眼を置くため、素子アンテナの指向特性を無指向性に、アンテナ配列を等間隔線形配置とし、送受信でのアンテナ数とアンテナ間隔をそれぞれ N_t 、 N_r 、 d_t 、 d_r とする。実効チャネル特性 A_e は、

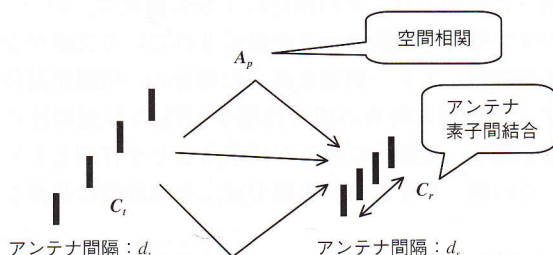


図1 MIMO チャネルにおける空間相関とアンテナ相互結合

要素別に次のように分解できる。

$$A_e(N_t, d_t, N_r, d_r) = C_t(N_t, d_t) A_p(N_t, d_t, N_r, d_r) C_r(N_r, d_r) \quad (3)$$

ここで、 A_p は伝搬チャネル特性、 C_t 、 C_r は送信および受信アンテナの相互結合行列(それぞれ $N_t \times N_t$ 、 $N_r \times N_r$ の行列)である。相互結合がない場合、 C_t 、 C_r は単位行列になり、チャネル容量は、式(2)で $A_e = A_p$ と置いたものになる。

このチャネル容量は、受信側でいかなる操作をしてもこれ以上の大きな値を得られないことを意味していることから、受信ブランチ信号に対して、相互結合行列 C_r と等価なネットワークを付加したとしても、チャネル容量が増加することはない。ところが、実際の相互結合は、式(1)のとおり、熱雑音に加わる以前の物理現象、すなわち、チャネル特性そのものを実効的に変えるもの($A_p \rightarrow A_e$)であるので、相互結合の影響がチャネル容量を上げる方向に働いたとしても不合理ではない。また、アンテナ間隔が狭くなると、伝搬現象である空間相関によってブランチ間の相関が増加するため、チャネル容量は、空間相関と相互結合の複合効果として現れる。これまでの検討で、様々な設定環境において種々の結果が報告され、システムティックな結論が導かれていないのも、アンテナと伝搬の複合効果に対する詳細検討の不十分さが理由になっていると思われる。

この問題を定量的に評価して、明確な結論を得るためには、

- i) アンテナの相互結合特性を正確に知ること
- ii) 伝搬モデルに基づく空間相関とアンテナ相互結合特性をともに取り入れた MIMO チャネルモデルでの評価を行うこと

が必要である。そこで、本稿では、この解明を目的として、その第一のステップであるアレーアンテナの相互結合特性の定量的な把握を次章以降で行う。

3. 放射パターン測定に基づく素子間結合特性の測定原理

アンテナ素子間の相互結合量を求める方法は、今まで多く提案されてきた。大別して、インピーダンス行列から求める方法と放射パターンから求める方法とがあるが、実物のアンテナを対象とした場合、アンテナの製作誤差やアレー配置誤差等を含めて放射パターンとして直接測定できる点で、後者が有利と判断する。

アンテナの放射パターンの測定値から相互結合量を推定する方法としては、フーリエ変換を用いる方法(例えば参考文献(10))と最小二乗法を用いる方法(例えば参考文献(7))とがある。本稿では、最小二乗法を用いる方法を選んだ。ここでは、図2に示す N 素子リニアアレーの場合を考える。

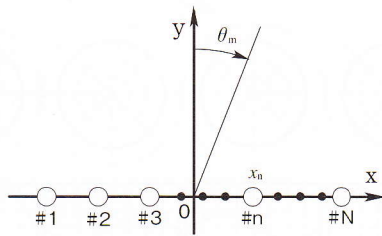


図2 N素子リニアアレー

アンテナ単体の遠方放射界は次式で表される。

$$F = \begin{bmatrix} f_1(\theta_1) & f_1(\theta_2) & \dots & f_1(\theta_M) \\ f_2(\theta_1) & f_2(\theta_2) & \dots & f_2(\theta_M) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_N(\theta_1) & f_N(\theta_2) & \dots & f_N(\theta_M) \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$f_n(\theta_m) = g_n(\theta_m) e^{-jkx_n \sin \theta_m} \quad (5)$$

ここで、 $g_n(\theta_m)$ はアンテナが原点に位置する場合のアンテナ単体の放射パターン、 x_n はアンテナの位置、 k は位相定数である。したがって、 $f_n(\theta_m)$ は、アレー位置におけるアンテナ間の相互結合が存在しない場合の放射パターンを表している。

実際には、相互結合が存在するので、アンテナの放射パターン $g_n(\theta_m)$ が $g'_n(\theta_m)$ へと変化する。したがって、アンテナ間の相互結合が存在する場合の放射パターンは次式となる。

$$F' = \begin{bmatrix} f'_1(\theta_1) & f'_1(\theta_2) & \dots & f'_1(\theta_M) \\ f'_2(\theta_1) & f'_2(\theta_2) & \dots & f'_2(\theta_M) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f'_N(\theta_1) & f'_N(\theta_2) & \dots & f'_N(\theta_M) \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$f'_n(\theta_m) = g'_n(\theta_m) e^{-jkx_n \sin \theta_m} \quad (7)$$

変化した放射パターンは、他のアンテナが2次波源となり、それらが合成されたものとする。アンテナ間の相互結合量 C を用いて次式となる。

$$F' = CF \quad (8)$$

$$C = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \dots & c_{1N} \\ c_{21} & c_{22} & \dots & c_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{N1} & c_{N2} & \dots & c_{NN} \end{bmatrix} \quad (9)$$

放射パターンのサンプル数 M が素子数 N 以上のとき、ムーア・ペンローズの一般化逆行列を用いて、相互結合量 C が求まる。

$$C = F F^H (F F^H)^{-1} \quad (10)$$

したがって、アンテナの放射パターン F と、アレーにより変化したアンテナの放射パターン F' とを精度よく測定できれば、相互結合量 C を正確に知ることができる。

アレーアンテナの放射パターン測定時において、放射パターン F は、測定するアンテナ以外を取り払って単体で測定したものに相当し、アレーにより変化した放射パターン F' は、測定対象以外のアンテナに終端器を接続して測定したものに相当する。放射パターン F については、あらかじめアンテナ素子単体を回転中心に設置して測定しておき、アレー位置に相当する位相分をかけることで、同様な放射パターンとなる。しかし、高い周波数においては、距離に対する位相変化は敏感であるとともに、回転中心が異なると送受間距離の差による違いが生じるという問題がある。ここでは、そのような問題を避けるために、アンテナ単体で測定する場合と、アレーして測定する場合とで、同一の位置に配置する。

4. スリーブアンテナアレーの素子間結合特性

4.1 測定アンテナと測定系

今回は、スリーブアンテナを使用し、4本のリニアアレーの場合を検証する。写真1にアンテナの概観を示す。

アンテナ素子は、長さ約33mm(0.56λ)、直径5mm(0.08λ)であり、アンテナの保護と構造的支持のために、FRP製の円筒状カバーで覆っている。カバーまで含めた直径は6.5mm(0.11λ)であり、0.125λ間隔でアレーが可能となっている。また、素子の下部にシュペルトップを2つ配置し、同軸ケーブルの外部導体への漏洩電流をカットしており、漏洩電流が放射パターンに与える影響を最小限にしている。アンテナは、ほぼ50Ωに整合しており、リターンロスで-15dB以下を確保している。

アンテナは、写真2に示すようなプラスチック製の台座を用いて設置し、0.125λ～1.5λの間隔で配列が可能である。

図3に測定系を示す。今回は、電波暗室内で測定を行った。送信アンテナから5.06GHzの搬送波を送信し、受信側では、回転架台上に所定の間隔でアンテナを配列し、回転架台を回転しながら受信電界を測定した。1回転あたりの測定サンプル数 M は720(0.5°ステップ)である。

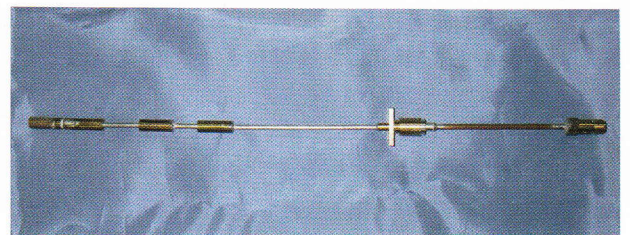


写真1 スリーブアンテナの概観

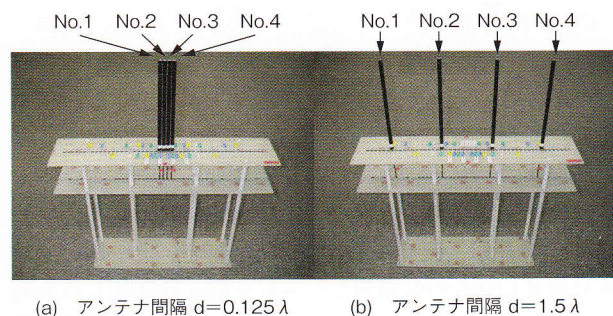


写真2 配列時外観

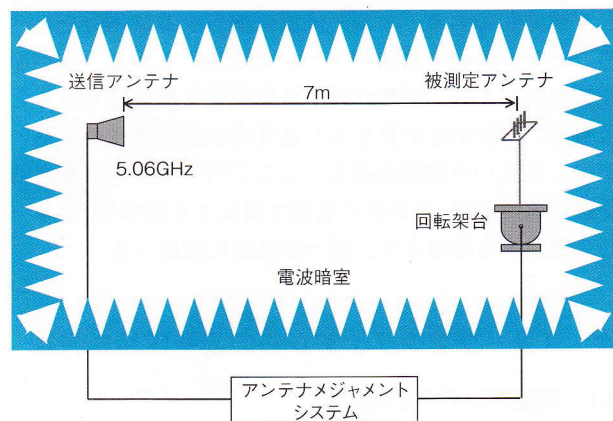


図3 測定系

送受信間距離は7mであり、アンテナ間隔が 1.5λ のときにも遠方界とみなせる距離である。

4.2 測定結果と検証

アンテナ素子間隔を 0.125λ から 1.5λ まで変化させ、Sパラメータおよび放射パターンの測定を行った結果を示す。

まず、各素子間隔において、測定対象以外のアンテナ素子を取り除いて測定した放射パターン F を示す。図4は、素子間隔が 0.5λ の場合の水平面放射パターンおよびその位相である。

各放射パターンは、偏差1dB以内の無指向性が得られており、各アンテナの水平面における最大放射方向の振幅差は、0.5dB以内である。また、アンテナのアレー位置により位相が変化しているが、位相パターンが対称になっており、アンテナ配置の精度、およびアレー中心と回転中心との一致の精度が良いことがわかる。

次に、各素子間隔において測定対象以外のアンテナに終端器を接続して測定した放射パターン F' を示す。図5は、各アンテナ間隔が 0.125λ , 0.25λ , 0.5λ , 1.0λ の場合の水平面放射パターンを示す。図中の実線がアレーにより変化した放射パターン F' を示している。素子間隔が近づくと、アレー内側のアンテナと外側のアンテナとで、放射パターンの違いが大きくなっていることがわかる。

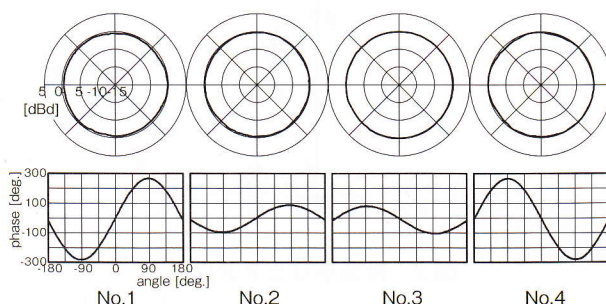
図4 アンテナ単体の水平面放射パターンと位相 ($d=0.5\lambda$)

図6は、アンテナ間隔を変化させた場合のSパラメータを示す。リターンロス、素子間隔が 0.375λ より狭まると悪化し始め、特に、内側のアンテナ素子のリターンロスは、劣化が大きい。また、結合量は、素子間隔が狭まるにつれ大きくなり、アンテナ素子間隔が等しいもの同士では、ほぼ等しい結合量となる。

測定した放射パターンを用いて、式(10)により計算したアンテナ間の相互結合量を求める。素子間隔が 0.125λ , 0.25λ , 0.5λ , 1.0λ の場合の結果は以下となる。

$$\begin{aligned}
 C(d=0.125\lambda) &= \begin{bmatrix} 0.797 - 0.074i & 0.195 + 0.068i & -0.539 + 0.153i & 0.244 + 0.155i \\ -0.178 + 0.021i & 0.794 - 0.144i & 0.033 + 0.063i & -0.195 + 0.127i \\ -0.134 + 0.111i & -0.194 + 0.022i & 1.090 - 0.067i & -0.350 - 0.039i \\ 0.232 + 0.111i & -0.600 + 0.129i & 0.238 - 0.028i & 0.801 - 0.061i \end{bmatrix} \\
 C(d=0.25\lambda) &= \begin{bmatrix} 1.000 - 0.070i & -0.319 + 0.276i & 0.164 + 0.045i & -0.002 - 0.076i \\ -0.276 + 0.241i & 0.957 - 0.098i & -0.275 + 0.264i & 0.127 + 0.101i \\ 0.155 + 0.136i & -0.357 + 0.130i & 0.965 - 0.098i & -0.251 + 0.199i \\ 0.061 - 0.094i & 0.074 + 0.068i & -0.219 + 0.277i & 0.960 - 0.083i \end{bmatrix} \\
 C(d=0.5\lambda) &= \begin{bmatrix} 0.978 + 0.051i & 0.123 + 0.188i & -0.061 - 0.085i & 0.043 + 0.070i \\ 0.139 + 0.147i & 0.934 + 0.072i & 0.125 + 0.143i & -0.085 - 0.101i \\ -0.065 - 0.101i & 0.090 + 0.175i & 0.977 + 0.099i & 0.144 + 0.227i \\ 0.038 + 0.063i & -0.049 - 0.093i & 0.155 + 0.181i & 0.970 + 0.055i \end{bmatrix} \\
 C(d=1.0\lambda) &= \begin{bmatrix} 0.972 + 0.024i & -0.048 - 0.154i & -0.023 - 0.036i & -0.028 - 0.039i \\ -0.076 - 0.138i & 0.979 + 0.013i & -0.045 - 0.108i & -0.035 - 0.050i \\ -0.025 - 0.050i & -0.025 - 0.151i & 0.981 + 0.029i & -0.073 - 0.146i \\ -0.023 - 0.033i & -0.025 - 0.046i & -0.069 - 0.127i & 0.987 + 0.027i \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

また、図7は、素子間隔と相互結合量の絶対値の関係を示す。アンテナ素子間の相互結合量は、アンテナ素子間隔が狭まるにつれ大きくなり、また、アンテナ間距離が近い素子同士ほど大きいという順当な傾向が見てとれる。しかし、素子間隔が 0.125λ になると、必ずしも、相互結合量は、アンテナ間距離が近い素子同士ほど大きいという結果にはならなかった。

ここで、相互結合量の計算結果の評価を行う。方法としては、式(8)の右辺 CF を計算し、どの程度 F' が再現できているかで評価する。図5の点線は CF のパターンを表しており、実線の F' のパターンがほぼ再現されていることがわかる。定量的な評価として、次式により残

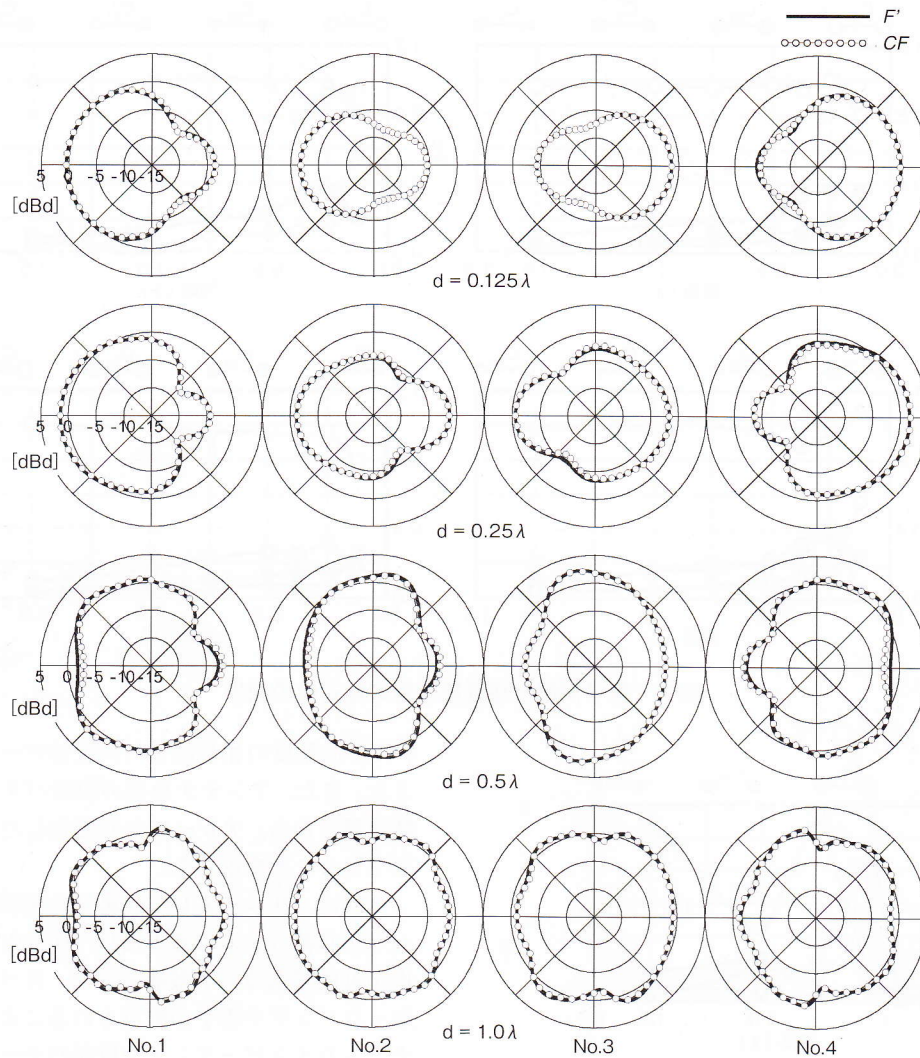


図5 各素子間隔の場合の水平面放射パターン

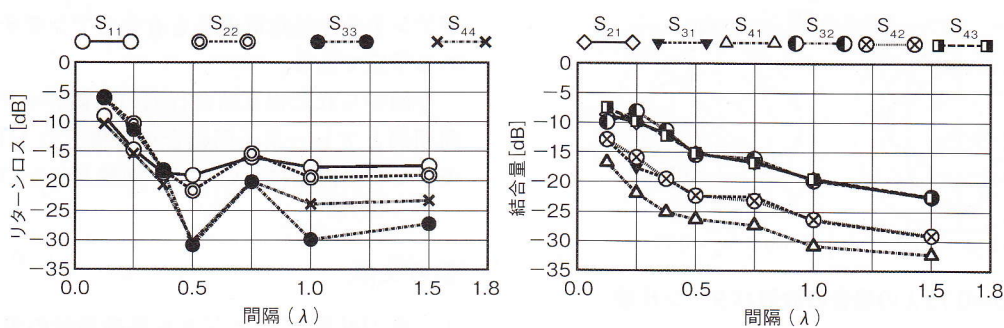


図6 各素子間隔の場合のSパラメータ

差二乗和を求める。

$$e_n = \sum_{m=1}^M |CF - F'|^2 \quad (11)$$

図8は各素子間隔における各アンテナに対する残差二乗和 e_1, e_2, e_3, e_4 を示す。

放射パターンのレベルの高い場所で不一致があると、

残差二乗和が極端に高くなる。例として、素子間隔が 0.75λ のときの残差が最も大きい素子 No.1 と、残差が最も小さい素子 No.3 の放射パターン F' および CF の比較を図9に示す。素子 No.1 の残差二乗和は 57.8 と比較的大きいが、放射パターンの残差は最大でも 1.3dB ($\theta_m = -18.5^\circ$) にとどまっており、精度良く相互結合量が求められているといえる。素子間隔によっては、4本のアン

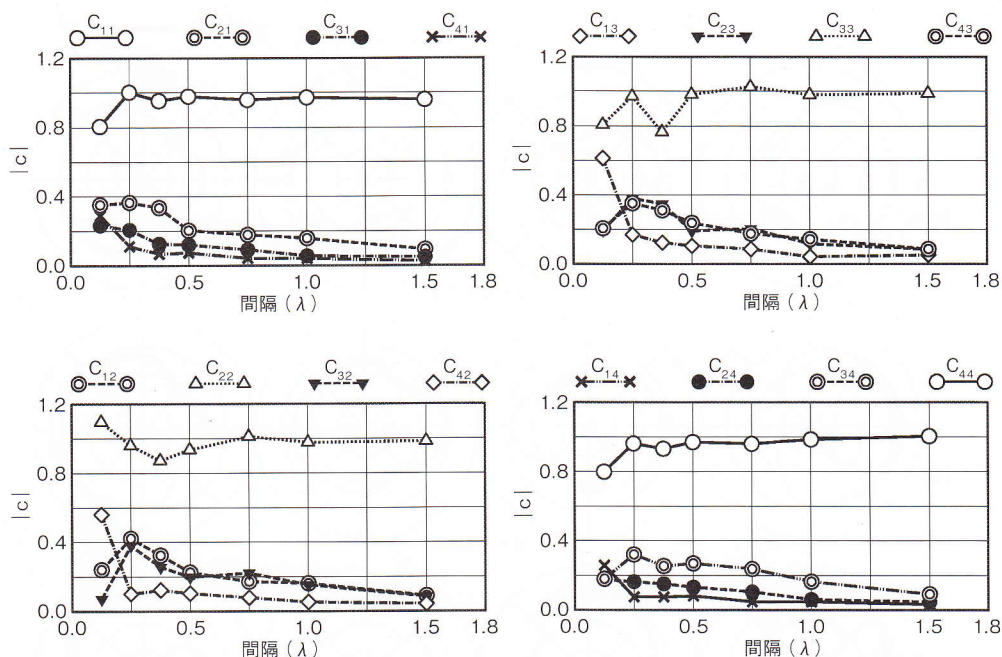


図7 素子間隔と相互結合量の絶対値の関係

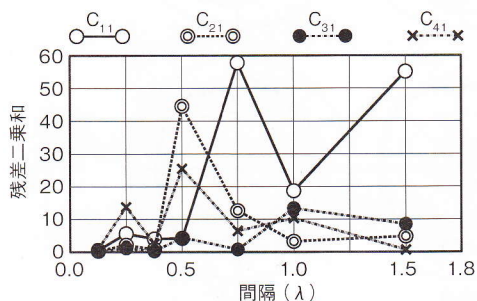
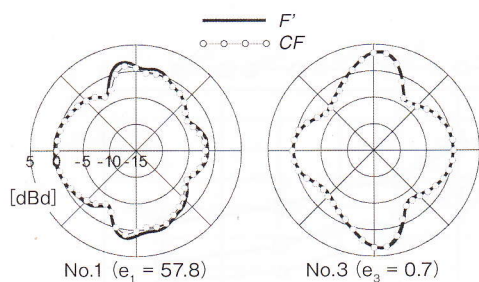


図8 各アンテナに対する残差二乗和

図9 $d=0.75\lambda$ の場合の放射パターン比較

テナのうち1, 2本のアンテナで不一致が見られることがあるが、各アンテナの残差二乗和は、素子間隔に依存するような変化はないといえる。

5. む す び

4素子リニアアレーの半波長スリーブアンテナを使用し、測定したアンテナの放射パターンを用いて、最小二乗誤差規範で、相互結合行列を求めた。各素子間隔にお

いて、高精度の相互結合行列数値データを得ることができた。また、アンテナ単体の放射パターンと求めた相互結合量とから、アレーにより変化した放射パターンが再現できることを示した。

今回は、リニアアレーの場合を検証したが、本稿で示した相互結合を求める方法は、任意の2次元アレーで応用が可能である。小型端末では、スペースの関係上、異なったアンテナ素子が配置されることも多い。各アンテナで入力インピーダンスや放射パターンが異なる場合においても、本方法は適用可能であると考えられる。また、検証用アンテナには、シングルモードアンテナの代表といえるスリーブアンテナを用いたが、今後は、マルチモードアンテナや無給電素子を有するアンテナでの検証を進める予定である。

今回得られた相互結合行列の数値データを用いた、空間相関とアレー素子間結合を考慮したMIMOチャネルモデルでの評価については、別稿としたい⁽¹¹⁾。

参考文献

- (1) 唐沢好男；“デジタル移動通信の電波伝搬基礎”，コロナ社，2003。
- (2) R. Janaswamy；“Effect of element mutual coupling on the capacity of fixed length linear arrays”，IEEE Trans. Antennas & Wireless Propagat. Lett., vol. 1, pp. 157-160, 2002。
- (3) S. Pan, S. Durrani, and M.E. Bialkowski；“MIMO capacity for spatial channel model”，IEEE AusCTW'07, pp. 25-29, 2007。
- (4) B. Clerckx, D. Vanhoenacker-Janvier, C. Oestges,

and L. Vandendorpe ; "Mutual coupling effects on the channel capacity and the space-time processing of MIMO communication systems", in Proc. IEEE ICC'03, pp. 2638-2642, 2003.

- (5) V. Jungnickel, V. Pohl, and C. Helmolt ; "Capacity of MIMO systems with closely spaced antennas", IEEE Trans. Commun. Lett., vol. 7, no. 8, pp. 361-363, 2003.
- (6) I. J. Gupta and A.A. Ksienski ; "Effect of mutual coupling on the performance of adaptive arrays", IEEE Trans. Antennas & Propagat. Vol. AP-31, no. 5, pp. 785-791, 1983.
- (7) 稲葉敬之, 坂本禎治郎, 三浦龍, 大堂雅之, 荒木純道 ; "アレーアンテナの初期校正に関する検討", 信学論(B), vol. J85-B, no. 10, pp. 1757-1769, 2002.
- (8) 山田寛喜 ; "高分解能到来方向推定の基礎と実際", 信学会 AP 研, アンテナ・伝搬における設計・解析手法ワークショップ, 第 33 回(テキスト, 第 5 章), 2006.10.
- (9) 山田寛喜 ; "アンテナ素子間相互結合の校正技術", アンテナ・無線ハンドブック, 6.2 節, オーム社, pp.495-499, 2006.
- (10) H. Steyskal, J. Herd ; "Mutual Coupling Compensation in Small Array Antennas", IEEE Trans. Antennas & Propagat., vol. 38, no. 12, pp. 1971-1975, 1990.
- (11) Dang Hung Le, B. S. Kumar, 谷口哲樹, 唐沢好男, 大島一郎 ; "空間相関とアレー素子間結合を考慮した MIMO 伝送特性 [III]", 信学技報 A・P Jan. 2008.

☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆



大島 一郎

平成 7 年入社

技術開発統括部 電気通信開発部
移動体通信アンテナおよびマイクロ波・
ミリ波アンテナの開発
電子情報通信学会



佐々木克守

平成 10 年入社

技術開発統括部 電気通信開発部
移動体通信アンテナおよびマイクロ波・
ミリ波アンテナの開発
電子情報通信学会



中田 幸男

平成 8 年入社

技術開発統括部 電気通信開発部
移動体通信アンテナおよび関連機器の開
発
電子情報通信学会



高橋 行隆

平成 14 年入社

技術開発統括部 電気通信開発部
各種アンテナ関連機器の開発
電子情報通信学会



唐沢 好男

電気通信大学教授

電波伝搬・アンテナ・デジタル伝送方
式の研究。工学博士
IEEE シニア会員・電子情報通信学会
フェロー