

3D-5 様々なアンテナ負荷状態における MIMO 特性評価

井浦 裕貴

山田 寛喜

山口 芳雄

新潟大学工学部 情報工学科

1. まえがき

MIMO システムにおいてアレーの素子間相互結合が与える影響は重要である。素子間相互結合はアンテナの入力インピーダンスを変化させるため、素子間隔に対し適切に受信機の負荷インピーダンスを選択しなければシステムの十分な性能を発揮できない。特に素子間隔の狭いアレーではその影響が顕著である。文献 [1] では電力を最大に伝送する整合回路を挿入し MIMO 特性を評価しているが、実際の受信機の内部負荷の値については言及していない。そこで、本稿では様々な負荷インピーダンスで終端した場合の MIMO 特性を評価し、最適なインピーダンスを検討する [2]。

2. SVD-MIMO

素子間隔の狭いアレーを用いる場合は素子間相互結合を考慮しなければシステムの正しい評価をすることはできない。素子間相互結合のある MIMO システムを考えると、チャンネル応答行列は伝搬路に起因するチャンネル応答 (H) に加え、近接素子からの再放射を示す行列 (素子間相互結合行列 C) を考慮する必要がある。よって、システム全体におけるチャンネル応答行列は $H' = CH$ となる。また、インピーダンス値 (整合状態) を変化させ MIMO の評価を行うにはインピーダンス値による変化分を考慮しなければならない。そこで、従来の SVD-MIMO におけるチャンネル応答行列 (H') の特異値による固有パス電力と容量の計算方法とは異なり、新たに相関行列 $CHH^H C^H Z^{(-1)H}$ を導入し、その固有値の実部を用いて受信信号電力 (P_{total}) を推定し、容量 (C_{MIMO}) の計算を行う。

$$P = \frac{1}{2} \text{Re} [r_i^H] = \frac{1}{2} \text{Re} [CHH^H C^H (Z^{-1})^H]$$

$$= \frac{1}{2} \text{Re} [U \text{diag} [\lambda_1, \dots, \lambda_m] V^H]$$

$$P_{total} = \text{trace} (P)$$

$$C_{MIMO} = \sum_{j=1}^m \log_2 \left(1 + \frac{\text{Re}[\lambda_j]}{2\sigma^2} \right)$$

ここで r は受信信号ベクトルであり、 i は負荷に流れる電流ベクトルである。また、 $Z = \text{diag} [z_1 \dots z_j]$ であり、 z_j は j 番目のアンテナの負荷インピーダンスである。 σ^2 は雑音電力である。本稿において送信側は素子間相互結合が無く、信号は互いに独立である理想的なアレーであり、注水定理による電力分配は行わないとする。

3. シミュレーション

レイリーフェージング環境における送信アンテナが2本、受信アンテナが2本の狭帯域 MIMO システムを考える。アンテナは2種類のダイポールアレーを用い、表1にそのパラメータを示す。評価対象となる負荷インピー

表1 アンテナパラメータ

	アンテナ A	アンテナ B
素子長	6.16 [cm]	5.78 [cm]
素子半径	0.125 [m]	0.05 [cm]
自己インピーダンス	105 + j49 [Ω]	72 + j0 [Ω]

ダンスは自己インピーダンス複素共役整合 (Z_{i1}^* match), 入力インピーダンス複素共役整合 (Z_{in}^* match), 容量最大整合 (optimal-match) である。optimal-match では負荷インピーダンスを抵抗、リアクタンスともに 1Ω ずつ変化させ、最大容量を得るインピーダンスを負荷とした。素子間相互結合はモーメント法 (NEC2) を用いて計算した。伝搬路に起因するチャンネル応答行列は受信アレーを中心とする散乱円上に一様ランダムに散乱点を配置し、それらの合成受信電界から求めた。周波数は 2.4GHz である。各アンテナ素子において、図1と図2はチャンネル容量、図3と図4は総受信電力を示す。各図は素子間隔無限大で自己インピーダンスの複素共役を負荷インピーダンスとした時の値で正規化したものである。図5、図6はチャンネル間の相関を示す。アンテナ A、アンテナ B ともに optimal-match において極めて素子が近接するときチャンネル間相関が急激に大きくなるが、一方総受信電力は減少傾向を回復できている。つまり、極めて素子が近接するときはチャンネルの独立性を保ち、複数のチャンネルを利用するよりも最大比合成として機能させ、第1固有パスからの信号を効率よく受信するようなインピーダンスを選択した方が効果的に容量を高めることを示している。また Z_{in}^* 整合は常に完全にチャンネル間相関を抑える効果があることがわかる。すべての素子間隔に対して最適な負荷インピーダンスではないが、ある程度以上の素子間隔では容量も最大となっていることが分かる。つまり極めて素子が近接している特殊な場合を除いては Z_{in}^* 整合がもっとも簡易であり、かつ最適な負荷インピーダンスであることがわかる。また、図7と図8は負荷インピーダンスの変化を示す。素子間隔が0に近いところで optimal-match のインピーダンスが大きく変化し、 $2Z_{i1}$ に近い値となり、理論値と等しいことが確認できる [3]。

4. むすび

2種類のアンテナ素子に対して各整合方法におけるレイリーフェージング環境下のMIMO特性を評価した。素子が極めて近接する特殊なアレーを用いる場合を除いて、 Z_{in}^* matchで最大容量が実現されることを確認した。また、この整合方法は完全にチャンネル間相関を抑圧する効果があることを確認した。

謝辞 この研究の一部は、日本学術振興会科学研究費補助金若手研究(B)15760257によるものである。

参考文献

- [1] Jon W. Wallace, et. al., Trans. IEEE Wireless Commun., Vol. 3, No. 4, July 2004.
- [2] 井浦 他, 信学技報, AP, Sep. 2005, 発表予定
- [3] 井浦 他, 信学技報, AP2004-301.

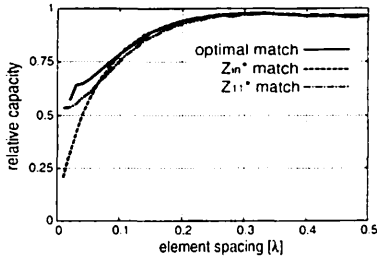


図1 チャンネル容量 (アンテナ A)

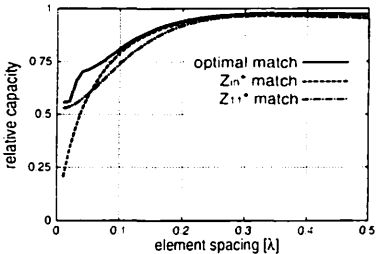


図2 チャンネル容量 (アンテナ B)

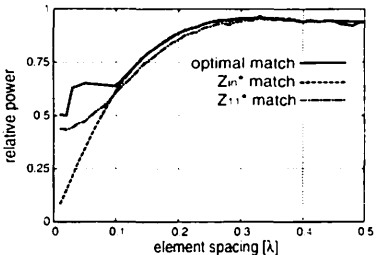


図3 総受信電力 (アンテナ A)

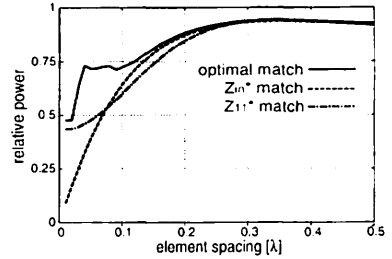


図4 総受信電力 (アンテナ B)

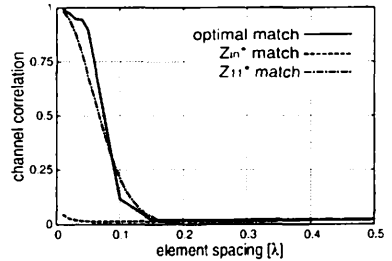


図5 チャンネル間相関 (アンテナ A)

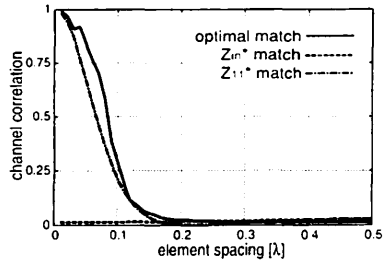


図6 チャンネル間相関 (アンテナ B)

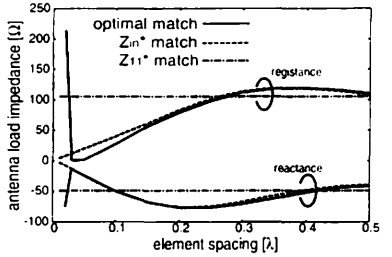


図7 インピーダンス変化 (アンテナ A)

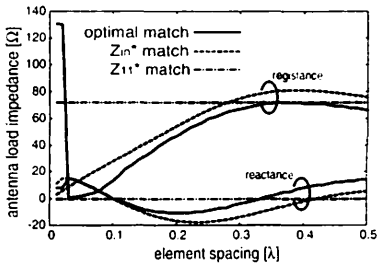


図8 インピーダンス変化 (アンテナ B)