

# Characteristic Mode 理論を用いた MIMO アンテナの伝送容量解析

## Analysis of MIMO Channel Capacity Using Theory of Characteristic Mode

本間 尚樹<sup>1</sup>  
Naoki Honma<sup>1</sup>

佐々木 穂<sup>1</sup>  
Minori Sasaki<sup>1</sup>

今野 佳祐<sup>2</sup>  
Keisuke Konno<sup>2</sup>

陳 強<sup>2</sup>  
Qiang CHEN<sup>2</sup>

岩手大学理工学部<sup>1</sup>

Faculty of Science and Engineering, Iwate University<sup>1</sup>

東北大学院工学研究科<sup>2</sup>

Graduate School of Engineering, Tohoku University<sup>2</sup>

### 1 まえがき

MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) システムの伝送容量を評価するためには、アンテナの指向性と伝搬特性の両方が必要となる。特に、アンテナ指向性を知るためにはアンテナの給電位置や給電回路を設計する必要がある。従来の MIMO アンテナの評価では、様々な設計パラメータを与えたアンテナを実際に設計し、伝搬特性をレイトレス法等により別に計算することでチャンネル容量を評価するなどの手法がとられて来た [1],[2]。しかし、何度もアンテナを設計するなど評価に多大な労力のコストが生じる。

Characteristic Mode 理論 (TCM: Theory of Characteristic Mode) を応用することによって MIMO アンテナの設計や性能評価を行う検討が進められている [3],[4]。アンテナ全体のおおよその構造が定まれば TCM を用いてアンテナ励振モードを計算することが可能であり、励振モードが判明すれば、その放射指向性は容易に計算可能である。つまり具体的な素子アンテナの構造や給電構造を設計せずに、その構造が持つチャンネル容量の上限を予測することができる。

本稿では、著者らがこれまでに検討してきた TCM に基づく MIMO アンテナの評価法について述べる。端末用 MIMO アンテナの設計を想定し、端末形状の導体板に対して TCM を用いてモード指向性を解析し、レイトレスによって求めた伝搬特性を組み合わせることでアンテナ性能を評価する。さらに、遠方界指向性を利用できない近距離 MIMO における TCM 適用法を検討する。近距離 MIMO の送受信アレーの開口に対応する導体板を考え、その間のチャンネル容量上限について検討を行う。

### 2 レイトレス法を用いた端末 MIMO アンテナの評価

本検討では端末形状の導体板をワイヤグリッドによりモデル化する。板状導体を線状ダイポールに置き換えることにより、細線近似を用いて解析する。この微小セグメントに対してモーメント法を適用し、導体板のインピーダンス行列  $Z = R + jX$  を求める。ここで、 $(R + jX)J_n = (1 + j\lambda_n)R J_n$  の関係が成立する。 $\lambda_n$  ( $|\lambda_1| \leq \dots \leq |\lambda_n| \leq |\lambda_{n+1}| \leq \dots$ )、 $J_n$  はそれぞれ第  $n$  モードの固有値と電流ベクトルである。これを整理すると

$$X J_n = \lambda_n R J_n \quad (1)$$

の関係が得られる。このモード電流から得られる放射特性を用いて MIMO 特性を評価する。

図 1 に本検討で取り扱う数値解析モデルの立体図および平面図を示す。ここで、コンクリート壁 ( $\epsilon_r = 6.76, \tan \delta = 0.0023$ ) で覆われた障害物のない部屋を想

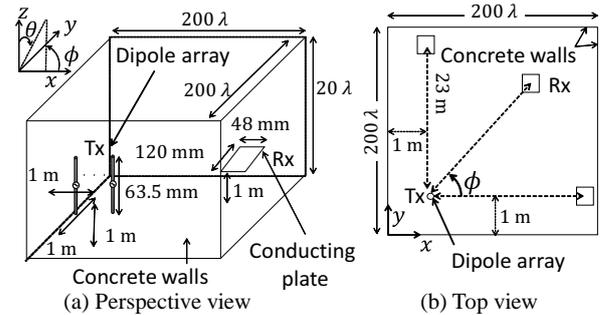


図 1 解析モデル

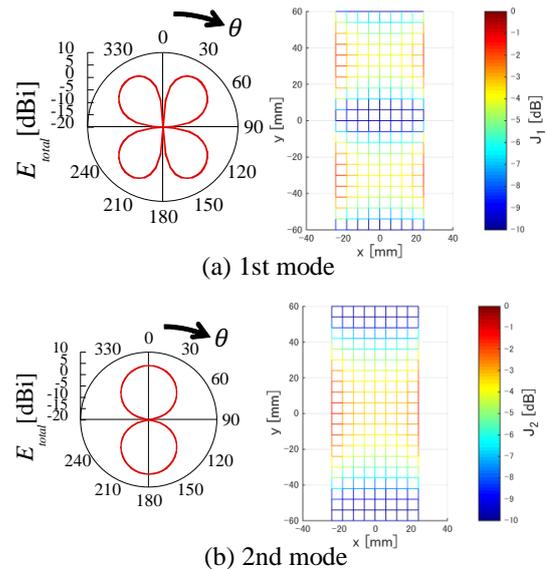


図 2  $zx$  面指向性  $E_{total}(\theta)$  と導体板上の電流分布

定する。Tx は中心周波数が 2.4 GHz の半波長ダイポールを  $x$  方向に等間隔に直線配置したアレーアンテナである。Rx は小形端末に用いられるグランド板を想定した板状導体とする。ここで、送信アンテナ位置から受信アンテナ位置の角度を  $\varphi$  ( $\varphi = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$ ) とした。送信側のアレー開口幅は  $2\lambda$  で一定とし、レイトレスにおける反射回数は 5 回とした。

図 2 に第 1, 第 2 モードの  $zx$  面指向性  $E_{total}(\theta)$  と導体板上の電流分布を示す。 $y$  軸方向の電流分布に着目すると、極大となる箇所は図 2(a) においては 2 つ、図 2(b) においては 1 つとなり、2 つのモードで極大となる位置が異なることが分かる。これから給電位置の選択によってモードの選択が可能であることが予想できる。

次にモード指向性から得られるチャンネル容量を実際に設計した小形アンテナのチャンネル容量と比較する。図 3(a)

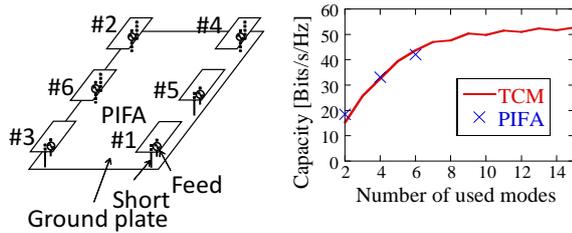


図3 PIFAモデルおよび平均チャネル容量解析結果

は本検討で用いた6素子PIFAモデルである。ここで、PIFA素子のパッチ導体は6mm×27mmで全て同一である。図3(b)に平均チャネル容量の使用モード数と使用PIFA数特性を示す。TCMの解析結果より、使用モード数が6を超えるとチャネル容量増加量が減少することが確認できる。一方、PIFAのチャネル容量もTCMチャネル容量と近い値を示していることが分かる。特にPIFAが6素子の場合のチャネル容量は $C_{PIFA6} = 42.0$  Bits/s/Hzであり、TCMモード数が6の場合のチャネル容量は $C_{TCM6} = 43.7$  Bits/s/Hzと、ほぼ一致する結果が得られた。以上より、本解析で扱う導体板に対するPIFAの妥当な実装数は6であり、これ以上のPIFA数の増加による容量向上効果は少ないもの推定できる。このように、TCMを用いることで、具体的なアンテナを設計せずにチャネル容量を予測可能であることが分かる。

### 3 TCMを用いた近距離MIMO伝送特性の評価

OAM (Orbital Angular Momentum) を含めた近距離MIMO伝送では、しばしば伝送可能なモード数の上限についての議論がなされる。このような問題に対してTCMを用いることで、アンテナの設計をせずに上限値を導き出せることが期待できる。近距離MIMOではアンテナ開口幅と伝送距離のオーダーが近いことが必要であり、その場合は前節で用いた遠方界指向性を用いることができない。そこで、本検討ではワイヤグリッドモデルから得られるZ行列をS行列に変換してモード解析を行う。

図4は、1辺が2波長の正方形の導体板が対向する近距離MIMOのワイヤグリッドモデルを示している。Z行列モデルから $S = (Z - z_0 I)(Z + z_0 I)^{-1}$ によりS行列を求める。ここで $z_0$ は基準インピーダンスである。S行列を区分行列に分けることで図に示す反射・伝送成分を求める。モード解析はアンテナ自信の反射成分に対応するS行列 $S_{TT}$ 、 $S_{RR}$ について行うものとし、その固有値( $\lambda_1 \leq \dots \leq \lambda_n \leq \lambda_{n+1} \leq \dots$ )はモードの反射係数に対応する( $S_{RT}$ のモードと異なることに注意されたい)。

図5にS行列のモード解析により計算したモード電流分布を示す。これより、構造が対称であるにも関わらず非対称な電流分布になることが分かり、電流分布だけでは規則性を見出すことは困難である。

図6に使用モード数に対する伝送容量を計算した結果を示す。ここで、送受信距離は1波長とし、使用する全モードに等しく電力を分配するものとする。これより、チャネル容量が最大になるモード数が存在することが分かる。この場合、モード数が27で最大容量37.8 Bits/s/Hzとなった。更にモード数を増加させた場合にチャネル容量が低下する理由は、反射が大きい高次の

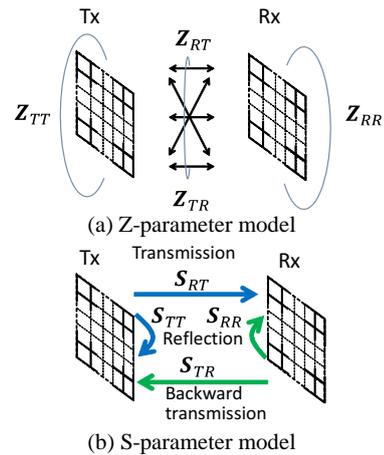


図4 近距離MIMOの解析モデル

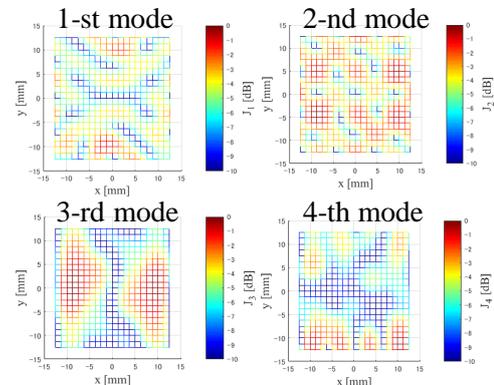


図5 モード電流分布

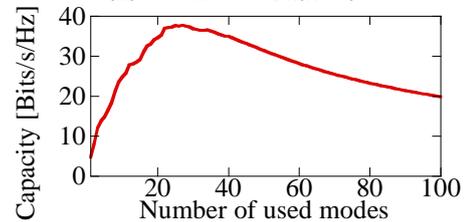


図6 モード数に対するチャネル容量

モードにも等しく電力が分配され、伝送に寄与する信号電力が低下するためである。

### 4 まとめ

本報告ではTCMを用いたMIMOアンテナの評価について、2通りの異なるシナリオについて検討した結果について述べた。TCMを用いることによって、おおよその構造に対して実装し得るアンテナ数を予測できることを明らかにした。

### 参考文献

- [1] D. Piazza et al. IEEE Trans. Antennas & Propagat., vol.56, no.3, pp.869-881, Mar. 2008.
- [2] X. H. Yu et al. Progress in electromagnetics research, vol. 130, pp.67-84, 2012.
- [3] H. Li et al. IEEE Trans. Antennas & Propagat., vol.62, no.5, pp.2756-2766, May 2014.
- [4] K. K. Kishor et al. IEEE Trans. Antennas & Propagat., vol.62, no.6, pp.3290-3298, Jun. 2014.