

CBFMを用いた大規模アレーアンテナの数値解析の高速化

A Fast Numerical Analysis of Large-Scale Array Antennas Using CBFM

今野 佳祐
Keisuke Konno

陳 強
Qiang Chen

東北大学大学院 工学研究科 通信工学専攻
Department of Communications Engineering, Graduate School of Engineering, Tohoku University

1 まえがき

近年, Massive MIMO に代表されるような, 送受信に多数のアンテナを用いた通信システムの研究が盛んに行われている [1], [2]. このような通信システムでは, 素子間距離を狭めてアレーアンテナ全体の大きさを小さくすることが望まれる. 素子間距離が狭いアレーアンテナでは, アレー素子が素子間相互結合の影響を強く受けるため, このようなアレーアンテナの特性を明らかにするためには, アレーアンテナの高精度な電磁界数値解析が必須である.

これまで, 電磁界シミュレータ HFSS を用いて, 有限要素法により屋内 Massive MIMO 用アレーアンテナの特性が数値的に明らかにされてきた [3], [4]. また, 電磁界シミュレータ FEKO を用いて, モーメント法により Massive MIMO 用ダイポールアレーアンテナの特性が数値的に明らかにされてきた [5]. これらの文献では, 素子間相互結合を考慮したアレーアンテナの特性が数値的に得られている. その一方, このような大規模アレーアンテナの数値解析には長い計算時間がかかるため, 数値解析の高速化が望まれる.

そこで本報告では, Characteristic Basis Function Method (CBFM) によって電磁界数値解析法の 1 つであるモーメント法を高速化する. CBFM によって大規模アレーアンテナの電磁界数値解析を行い, 必要な計算時間を削減すると共に, 素子間相互結合が大規模アレーアンテナの指向性に及ぼす影響を定量的に明らかにする.

2 CBFM

モーメント法では, アンテナを複数の電流セグメントに分割し, セグメント間の自己・相互インピーダンスを求めて行列方程式を得る [6], [7]. そして, 得られた行列方程式の逆行列を求めてアンテナの電流を求めるが, 逆行列の計算時間がセグメント数 N の 3 乗に比例するため, 大規模問題の数値解析には高速化が必須である.

Characteristic Basis Function Method (CBFM) は, 直接法に基づく高速モーメント法の 1 つとして知られている [8]. まず, CBFM では大規模アンテナを複数のセグメントから成る M 個のブロックに分割し, ブロック行列方程式を解く. ブロック行列方程式を解いて得られた電流は, ブロック内の電流分布を近似的に表す大域的な基底関数 (Macro Basis Function, MBF) とみなすことができ, これを Characteristic Basis Function (CBF) と呼ぶ. 得られた CBF と Galerkin 法により, 元の $N \times N$ 行列を $M^2 \times M^2$ の行列に圧縮することができる. 従っ

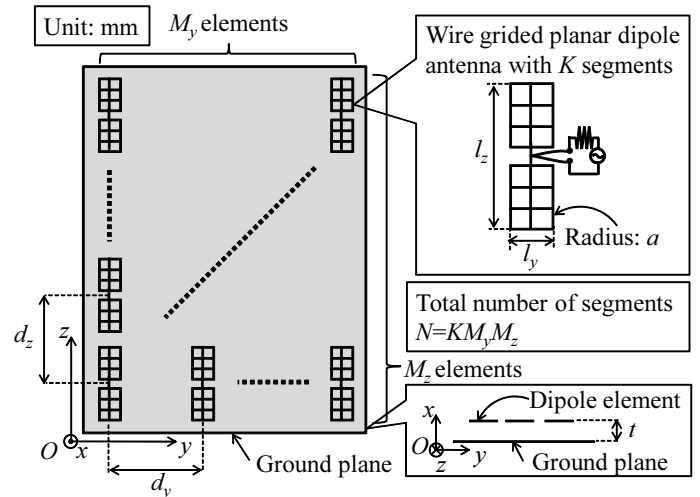


図1 反射板付板状ダイポールアレーアンテナ.

て, $M^2 \ll N$ となるようにブロック数 M を選べば, 圧縮した行列方程式を解くことで大規模行列方程式の近似解が求まる.

また, ブロック行列方程式を解く際, そのブロックに近接したセグメントを含むように拡張したブロック行列方程式を解くことで, CBF を高精度に求められることが分かっている. 従って, CBFM の計算時間と精度は, ブロック数 M と拡張ブロック行列方程式のサイズの両方で決まる.

3 数値解析

図1に示す $M_y \times M_z$ 素子の板状ダイポールアレーアンテナを CBFM で数値解析した. Richmond のモーメント法を用い, 板状ダイポールアンテナは半径 a のワイヤセグメント K 個に分割した. 反射板の大きさを無限大と仮定し, 鏡像法を用いた. 各素子には同相・同振幅の給電を与えた. CBFM のブロック数は最小のオーダーの計算時間を与えるブロック数 $M \approx 0.9N^{1/3}$ とした [9]. また, 図2に示すように, CBFM で解く拡張ブロック行列方程式は, 当該ブロックに隣接する素子を含む大きさのブロック行列方程式とした. 本報告の数値解析結果は, Intel Core i-5-3470 3.2GHz CPU を用いて得られた.

図3及び図4に, 8×8 素子の板状ダイポールアレーアンテナの動作利得パターンを示す. CBFM によって得られた結果が従来の MoM によって得られた結果とよく一致していることが分かる. その一方で, 素子間相互結合の影響を無視して求めた動作利得パターンは, 従来

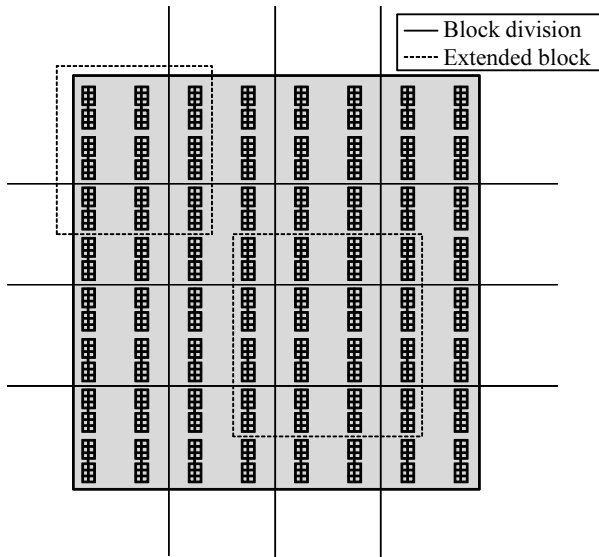


図2 CBFMのブロック分けの一例。

のMoMによって得られた動作利得パターンと異なっている。特に、素子間距離が75 mm($= 0.5\lambda$)と小さいときは、素子間相互結合の影響により利得が1 dB程度低下することが分かる。アレー素子の入力電力は素子間相互結合の影響を受けるため、有限なアレーアンテナでは、アレー素子の入力電力は素子ごとに異なる。加えて、素子間相互結合の影響により、素子単体の指向性とアレー素子の指向性は異なる。従って、大規模アレーアンテナの実際の特性を得るためには、素子間相互結合の影響を考慮することが必須である。

また、従来のMoMで 8×8 素子の板状ダイポールアレーアンテナ($N = 6016$)を数値解析するのに要した時間は約3時間だったのに対し、CBFMでは約20分だった。したがって、CBFMは大規模アレーアンテナの数値解析の高速化に有効なことが分かる。

4 まとめ

本報告では、高速モーメント法の1つであるCBFMを用いて、大規模アレーアンテナを数値解析した。動作利得パターンにおける素子間相互結合の影響を定量的に明らかにし、CBFMによって大規模アンテナの数値解析を高い精度で高速に行えることを明らかにした。

謝辞

本研究は、JSPS 科研費 25420394, 25420353, 26820137の助成を受けた。また、本研究成果の一部は東北大学電気通信研究所における共同プロジェクト研究の成果である。最後に、本研究の遂行に際し、東北大学サイバーサイエンスセンターのスタッフからアドバイスを頂いたことに謝意を表す。

参考文献

- [1] F. Rusek et al., IEEE Signal Process. Mag., vol.30, no.1, pp. 40-60, Jan. 2013.
- [2] E.G. Larsson et al., IEEE Commun. Mag., vol. 52, no. 2, pp. 186-195, Feb. 2014.

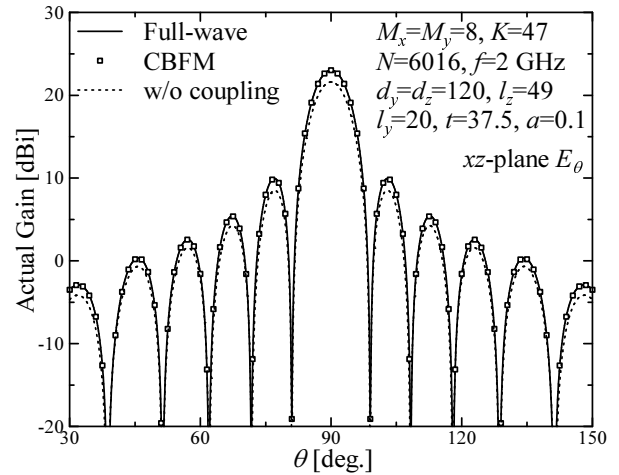


図3 動作利得パターン ($d_y = d_z = 120$ mm).

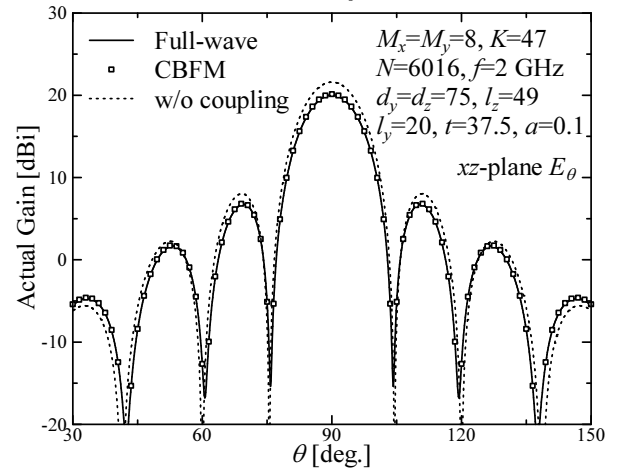


図4 動作利得パターン ($d_y = d_z = 75$ mm).

- [3] X. Artiga et al., Proc. IEEE AP-S Int. Symp., pp.1-2, July 2012.
- [4] X. Artiga et al., IET Microw. Antennas Propag., vol.8, no.1, pp.1-9, Jan. 2014.
- [5] 板橋 慎二等, 信学技報, vol.113, no.487, AP2013-187, pp.13-18, 2014年3月.
- [6] R.F. Harrington, Field Computation by Moment Methods, New York, Macmillan, 1968.
- [7] J.H. Richmond and N.H. Greay, IEEE Trans. Antennas Propag., vol.23, no.5, pp.412-414, May 1975.
- [8] V.V.S. Prakash and R. Mittra, Microw. Opt. Technol. Lett., vol.36, no.2, pp.95-100, Jan. 2003.
- [9] K. Konno et al., IEEE Trans. Antennas Propag., vol.60, no.10, pp.4719-4724, Oct. 2012.