

インピーダンス拡張法による超大規模周期的アレーアンテナの解析

今野 佳祐[†] 陳 強[†] 澤谷 邦男[†] 瀬在 俊浩^{††}

[†] 東北大学大学院 工学研究科 電気通信工学専攻 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-05

^{††} 宇宙航空研究開発機構, 茨城県

E-mail: †{konno, chenq, sawaya}@ecei.tohoku.ac.jp

あらまし 宇宙太陽光利用システム (SSPS) に用いられる電力伝送用大規模周期的アレーアンテナの放射特性を評価するために, 超大規模周期的アレーアンテナの特性解析が必要となる. しかし, 超大規模な周期的アレーアンテナでは解析対象となる素子数が極めて多いため, 直接的な数値解析は不可能であるという問題点がある. そこで, 本論文では超大規模な周期的アレーアンテナの特性を近似的に解析する手法としてインピーダンス拡張法を提案し, 給電振幅分布に一樣分布とテーパ分布を与えた場合についてその有効性を検討した.

キーワード モーメント法, インピーダンス拡張法, 周期的アレーアンテナ

Analysis of Large-scale Periodic Array Antenna Using Impedance Extension Method

Keisuke KONNO[†], Qiang CHEN[†], Kunio SAWAYA[†], and Toshihiro SEZAI^{††}

[†] Department of Electrical Communications Engineering, Graduate School of Engineering, Tohoku University
Aramaki Aza Aoba 6-6-05, Aoba-ku, Sendai, 980-8579, Japan

^{††} Japan Aerospace Exploration Agency, Sengen, Tsukuba-shi, Ibaraki, 305-8505 Japan

E-mail: †{konno, chenq, sawaya}@ecei.tohoku.ac.jp

Abstract Size of a periodic array antenna used for the power transmission in space solar power systems is huge. Analysis of such a huge periodic array antenna is important to estimate radiation property of a periodic array antenna, but the CPU time and memory size required for the direct analysis are also huge and exact numerical analysis is almost impossible. In order to overcome this difficulty, impedance extension method is proposed as a method of approximate analysis for a huge periodic array antenna. Validity of the impedance extension method is investigated for uniform and tapered distribution of feeding amplitude.

Key words Method of Moments(MoM), impedance extension method, huge periodic array antenna

1. 背景

近年, 石油をはじめとしたエネルギー資源の枯渇が問題となっており, 将来予測されるエネルギー不足を解決する方法として, 静止衛星の大規模な太陽電池で発電し, マイクロ波を用いてその電力を地上に無線送電する SSPS(Space Solar Power Systems) の研究が行われている [1]. SSPS から地上に電力を送電するためには超大規模な周期的アレーアンテナが用いられる. マイクロ波のビーム幅を極めて細くするために, 周期的アレーアンテナの素子数は 10 億ほどになると試算されており, 実用化に向けてそのビーム幅や指向性, エッジ効果の影響などを解析する必要がある.

アンテナの解析手法の 1 つとしてモーメント法 (MoM) が挙

げられる [2], [3]. モーメント法は周期的アレーアンテナの解析にも非常に有効な手法であるが, $N \times N$ 行列方程式の解法にガウス消去法を用いると, 計算時間は N^3 , メモリは N^2 にそれぞれ比例する. このことから, 約 10 億素子を有する SSPS 用周期的アレーアンテナの解析は困難であり, 解析手法の効率化が重要となる.

解析手法の効率化を図るために, 様々な試みがなされてきた. 行列方程式の解法に Gauss-Seidel 法や SOR 法 (Successive Over Relaxation method), CG 法 (Conjugate Gradient method) などといった反復法を用いて大規模問題の計算時間を改善するという試みが代表的である [4]- [7]. 反復法を用いると大規模問題の計算時間は理論上 $O(N^2)$ に抑えられるが, 実際は MoM における行列が反復法を用いて解くのに有利な対角優位

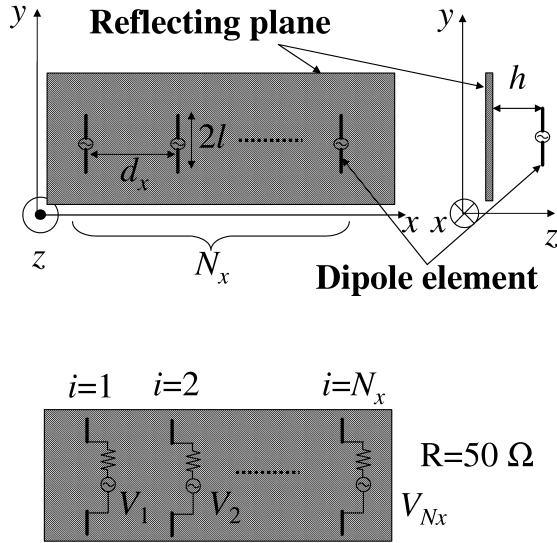


Figure 1 1次元ダイポールアレーモデル.
Fig. 1 One dimensional dipole array model.

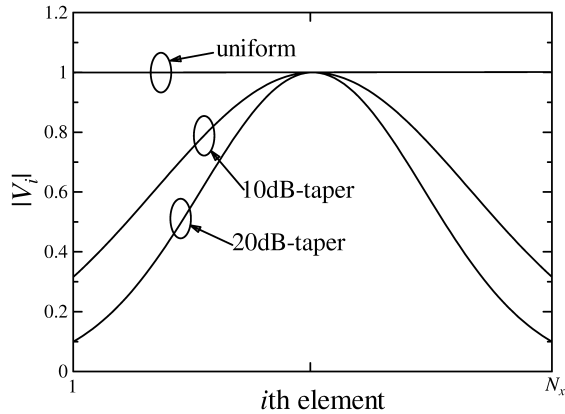


Figure 2 ガウス分布によるテーパ.
Fig. 2 Taper with Gauss distribution.

行列であることが少ないために、収束性が悪くなり、反復回数が大きくなってしまふことが多い。そこで、FMM(Fast Multipole Method)やMLFMA(Multi-Level Fast Multipole Algorithm)を用いて、反復法における行列-ベクトル積の計算量を減らす研究も行われている [8]- [10]。実際に1万素子程度の大規模な周期的アレーアンテナの解析をパーソナルコンピュータでも可能にするための手法としては、CG-FMM-FFT法、前処理付きCG-FFT法が提案されている [11]- [13]。しかし、これらの手法を用いてもSSPSに用いられる10億素子のアレーアンテナを解析することはほとんど不可能である。

本論文では、周期的アレーアンテナの動作インピーダンスは給電振幅分布にほとんど依存せず、アレー構造によって決まると考えられることから、それを用いて大規模な周期的アレーアンテナの動作インピーダンスを超大規模な周期的アレーアンテナの動作インピーダンスに拡張することにより、近似的に超大規模な周期的アレーアンテナの解析を可能にするインピーダンス拡張法を提案する。また、1次元のダイポールアレーモデルについてその有効性を検討した結果を述べる。

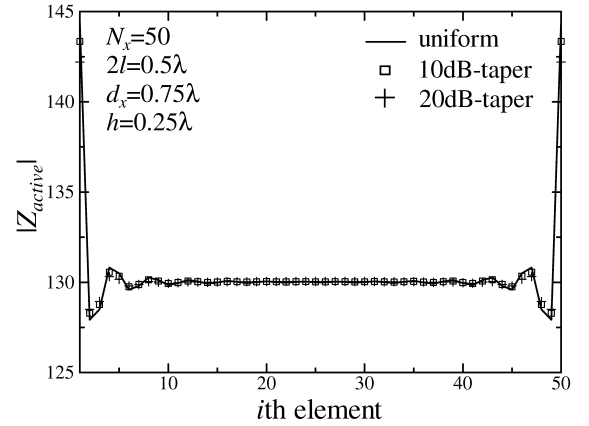


Figure 3 10dB, 20dB テーパ給電の動作インピーダンス (絶対値).
Fig. 3 Active impedance of an array antenna fed by 10dB, 20dB taper (absolute value).

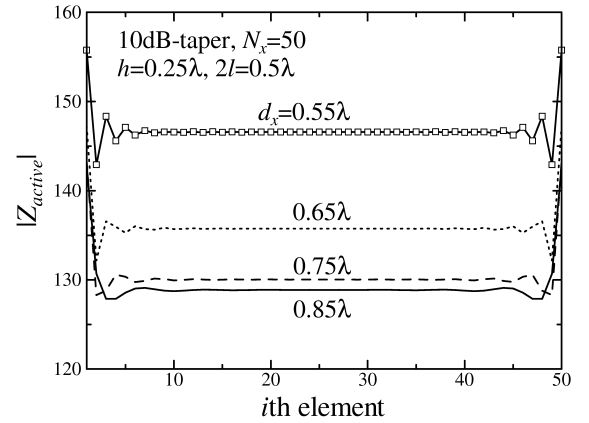


Figure 4 素子間距離 \$d_x\$ の変化に対する動作インピーダンス (絶対値).
Fig. 4 Active impedance of an array antenna for different \$d_x\$ (\$2l = 0.5\lambda\$, absolute value).

2. インピーダンス拡張法の原理

大規模な周期的アレーアンテナでは、全ての素子が給電された状態における中央部の素子の入力インピーダンス、即ち動作インピーダンスは一律な値となることが知られている。また、エッジ部分の素子の動作インピーダンスはエッジとの距離に依存するが、アレーアンテナの規模にはほぼ無関係であると考えられる。従って、まず大規模の周期的アレーアンテナを解析して、その結果を超大規模な周期的アレーアンテナに拡張することが可能であると考えられる。この手法をインピーダンス拡張法と呼ぶことにする。インピーダンス拡張法は従来の数値計算法とは違い、数値解析するのは超大規模な周期的アレーアンテナ自体ではなくそれよりも小規模な周期的アレーアンテナである。従って、超大規模な周期的アレーアンテナを直接数値解析する場合に比べて、メモリも数値計算時間も大幅に削減できる。

2.1 アレー素子の動作インピーダンス分布

まず、インピーダンス拡張法の妥当性を検証するために、図1に示す1次元ダイポールアレーモデルに対して、各素子の動作インピーダンスを求めた。アレーパラメータは素子数 \$N_x = 50\$、

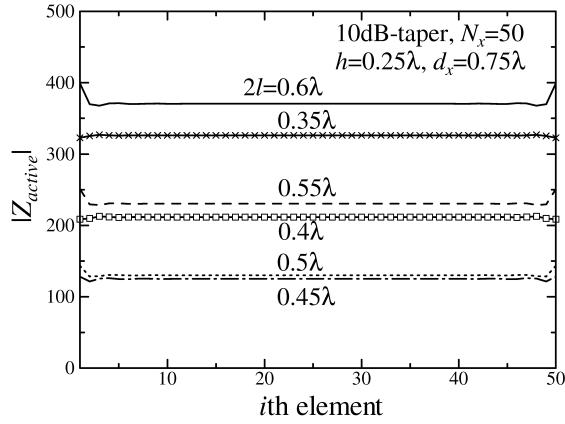


Figure 5 素子長 $2l$ の変化に対する動作インピーダンス (絶対値).
Fig.5 Active impedance of an array antenna for different $2l$ ($d_x = 0.75\lambda$, absolute value).

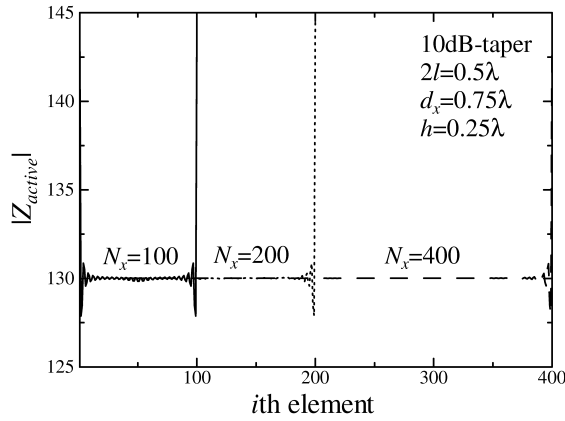


Figure 6 素子数 N_x の変化に対する動作インピーダンス (絶対値).
Fig.6 Active impedance of an array antenna for different N_x ($d_x = 0.75\lambda$, $2l = 0.5\lambda$, absolute value).

ダイポール素子長 $2l = 0.5\lambda$, 素子間隔 $d_x = 0.75\lambda$, 反射板とダイポール素子の間隔 $h = 0.25\lambda$ である. また, モーメント法を用いるときに, 各ダイポール素子を 3つのセグメントに分割した. アレーアンテナの励振分布として, 一様な振幅分布だけでなく, 図2に示すようにエッジレベルが -10dB と -20dB のガウス分布を与えた.

図3に給電分布として同相で一様分布, 10dB 及び 20dB テーパー分布を与えたときの動作インピーダンスの絶対値を示す. この図から, 周期的アレーアンテナのエッジ部分では動作インピーダンスの絶対値の変動が大きいのに対し, 中央部分ではほぼ一様な値であることが確認できる. また, 動作インピーダンスの絶対値は給電振幅分布にほとんど依存しないことが分かる.

次に, 動作インピーダンスとアレーパラメータの関係を明らかにするために, 素子間距離 d_x とダイポール素子長 $2l$, アレー素子数 N_x を変えて解析を行った. 給電は 10dB テーパーで, $h = 0.25\lambda$ とした.

図4, 図5にそれぞれ素子間距離 d_x , ダイポール素子長 $2l$ を変えたときの動作インピーダンスの絶対値を示す. アレーパラメータを変えると動作インピーダンスの絶対値は変化しているが, 図3の場合と同様に中央部分では一様で, エッジ部分で変

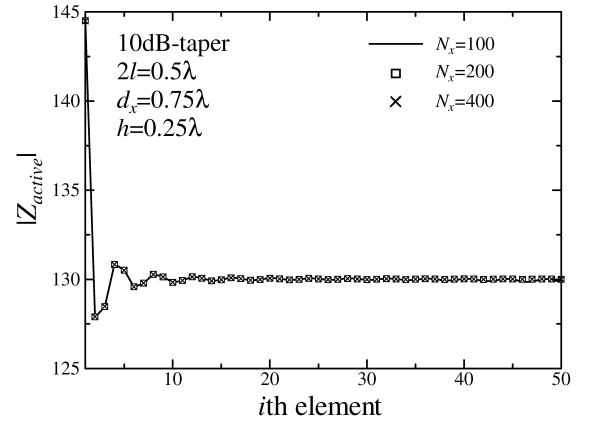


Figure 7 素子数 N_x の変化に対する動作インピーダンス (絶対値, エッジ部).

Fig.7 Active impedance of an array antenna for different N_x ($d_x = 0.75\lambda$, $2l = 0.5\lambda$, absolute value, representation of edge).

動する傾向は変わらなかった.

図6, 図7に素子数を $N_x = 100, 200, 400$ と変えたときの動作インピーダンスの絶対値を示す. エッジ部分と中央部分それぞれで動作インピーダンスの絶対値は素子数 N_x にほとんど依存せずほぼ一致していることが分かる.

2.2 インピーダンス拡張法

前節の解析から, 動作インピーダンスについて以下のことが分かった.

- (1) 給電振幅分布にほぼ依存しない.
- (2) 周期的アレーアンテナの中央部ではどの素子もほぼ同じ値で, エッジ部分で変動が激しい.
- (3) 素子長・素子間隔が同じなら, 素子数が変化しても中央部だけでなくエッジ部でもその値はほぼ一致する.

以上のことから, 大規模な周期的アレーアンテナ各素子の動作インピーダンスを超大規模な周期的アレーアンテナの各素子に拡張するというインピーダンス拡張法の妥当性が示された.

具体的な拡張法を図8に示す. 超大規模な周期的アレーアンテナ (Huge array) のエッジ部分にある素子には, 大規模アレーアンテナ (Large array) のエッジ部分にある素子の動作インピーダンスを超大規模アレーアンテナの同じ幅に拡張する. また, 大規模アレーアンテナの中心素子の動作インピーダンスを超大規模アレーアンテナの中央部分にある全ての素子に拡張する. エッジ部分と中央部分の境界を決めるために,

$$\Pi_L(i) = \frac{|Z(i) - Z(N_x/2)|}{|Z(N_x/2)|} \quad i = 1, \dots, N_x \quad (1)$$

で定義される誤差を用い, この値が十分に小さな値となるエッジの幅の素子数 W_i を数値計算により求めた. 図9は, エッジ部分にある素子のうち, 中央にある素子の動作インピーダンスの値からの変化が 0.3% 以上 ($\Pi_L > 0.3\%$) となる素子数 W_i をプロットしたものである. この図より, 例えば $N_x = 20$ では5素子, $N_x = 200$ では7素子をエッジ部分であると定めることができる. なお, 図9では $\Pi_L > 0.3\%$ を基準としたが, 要求さ

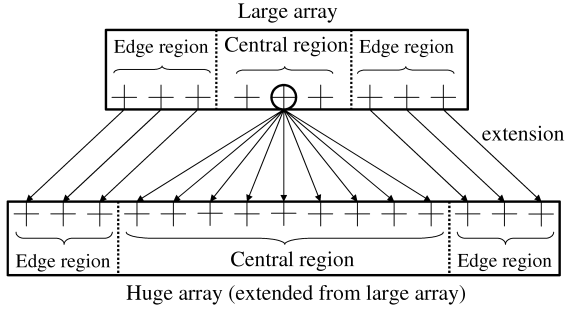


Figure 8 インピーダンス拡張法の説明.

Fig. 8 Introduction of impedance extension method.

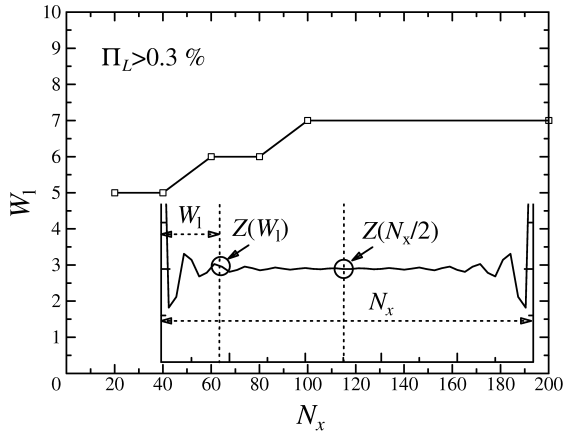


Figure 9 $\Pi_L > 0.3\%$ となる素子数.

Fig. 9 Number of elements yielding $\Pi_L > 0.3\%$.

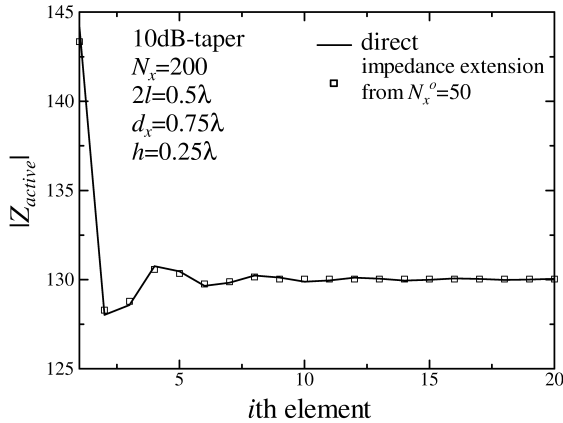


Figure 10 インピーダンス拡張法と直接計算の比較 (絶対値, エッジ部).

Fig. 10 Comparison of the impedance extension method with direct calculation (absolute value, edge region).

れる精度に応じて Π_L を設定すればよい.

図 9 の結果に基づき, 実際にインピーダンス拡張法を適用した. 素子数 $N_x^o = 50$ の大規模アレーアンテナの動作インピーダンスを, $N_x = 200$ の超大規模アレーアンテナのエッジ部分の両端 7 素子と中央部分の動作インピーダンスに拡張し, その動作インピーダンスの絶対値及び動作利得パターンを求めた. 図 10 に, インピーダンス拡張法と直接計算を用いて求めた動作イン

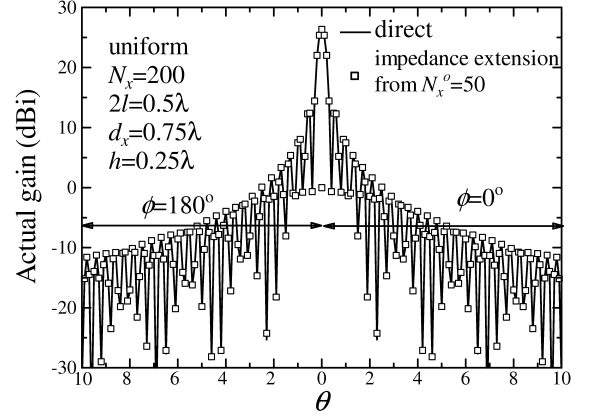


Figure 11 動作利得パターン. インピーダンス拡張法と直接計算の比較 (一様分布).

Fig. 11 Comparison of actual gain between the impedance extension method and direct calculation (uniform distribution).

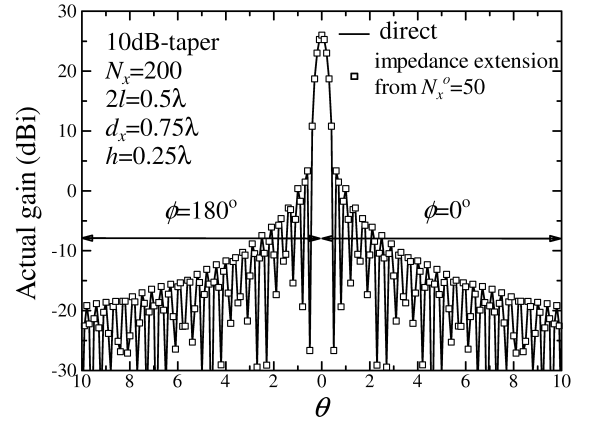


Figure 12 動作利得パターン. インピーダンス拡張法と直接計算の比較 (10dB テーパー分布).

Fig. 12 Comparison of actual gain between the impedance extension method and direct calculation (10dB taper distribution).

ピーダンスの絶対値を示す. また, 図 11~13 には, 一様分布及びテーパ分布のときの動作利得パターンを示す. 動作インピーダンス及び動作利得パターン共に直接計算とインピーダンス拡張法との間に差はなく, ほぼ一致している.

3. インピーダンス拡張法による解析の誤差評価

前節ではインピーダンス拡張法の解析精度を, 周期的アレーアンテナの動作インピーダンス及び動作利得パターンから評価したが, ここでは得られた動作利得パターンの精度を定量的に評価する.

動作利得パターンの誤差を

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^P |E_1(\theta_i) - E_2(\theta_i)|^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^P |E_1(\theta_i)|^2}} \quad (2)$$

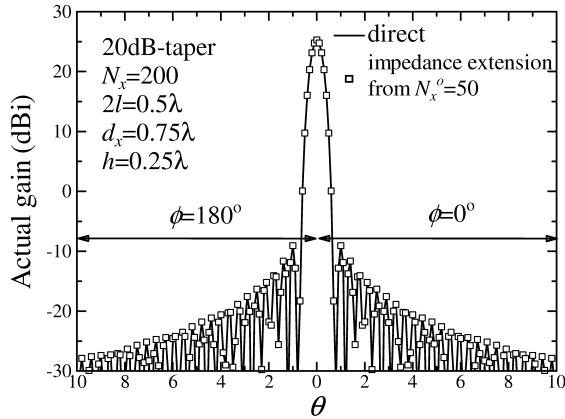


Figure 13 動作利得パターン. インピーダンス拡張法と直接計算の比較 (20dB テーパー分布).

Fig. 13 Comparison of actual gain between the impedance extension method and direct calculation (20dB taper distribution).

で定義する. ここで, $E_1(\theta_i)$ はモーメント法を用いて直接求めた電流から得られた放射電界であり, $E_2(\theta_i)$ はインピーダンス拡張法を用いて求めた電流から得られた放射電界である. P は角度 θ_i の全点数である.

ここでは, エッジ部分を考慮せずに全ての素子に中央部の均一な動作インピーダンスを与えた uniform extension とエッジ部分を考慮して動作インピーダンス部分を拡張した impedance extension の結果を比較した. 放射パターンは $P = 36000$ 点計算した.

拡張元となる周期的アレーアンテナの素子数を $N_x^o = 15, 50, 150$ と変化させたときに誤差がどのように変化するかを調べた. その結果を図 14 に示す. なお, impedance extension におけるエッジ部分は両端 7 素子とした. この図によると uniform extension と impedance extension のどちらも, 拡張元である周期的アレーアンテナの素子数の変化による誤差の変動は 0.2% 程度に過ぎなかった. これは, 周期的アレーアンテナのエッジ部分と中央部分の動作インピーダンスは 15 素子程度でそれぞれほぼ一定値になるため, 拡張元の素子数を $N_x^o = 15$ 程度とすれば十分であることを示している. また, 拡張元である周期的アレーアンテナの素子数が同じなら, uniform extension よりも impedance extension の方が誤差が小さくなっており, エッジ部分を考慮した拡張を行った方が誤差を小さく抑えられるということが分かる. さらに, 拡張元となる周期的アレーアンテナの素子数が増えるにつれて, uniform extension と impedance extension の誤差は徐々に近づいている. これは拡張元となる周期的アレーアンテナの素子数を大きくすると全素子数に対するエッジ部分の割合が相対的に小さくなるため, 誤差に対するエッジ部分の寄与が小さくなっているためと考えられる.

4. む す び

本論文では, 超大規模な周期的アレーアンテナの近似解析手法として, インピーダンス拡張法を提案した. 本手法は, 有限な規模の小さい周期的アレーアンテナをモーメント法により解

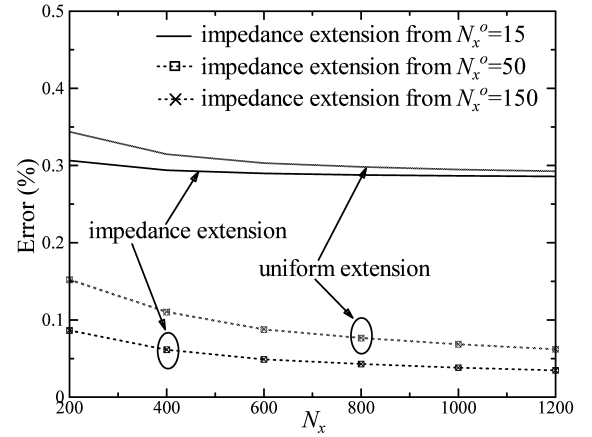


Figure 14 インピーダンス拡張法の誤差. 元となるアレーの素子数に対する変化.

Fig. 14 Error-rate of the impedance extension method for an element number of an original array.

析し, より大規模な周期的アレーアンテナの入力インピーダンスを推定するものであり, 超大規模な周期的アレーアンテナのサイズや給電振幅の分布に依存しないという利点を有している. また, 本手法を用いた数値解析を行い, 超大規模な周期的アレーアンテナの指向性が高精度で計算できることを示した.

本論文では, インピーダンス拡張法はアレー構造が周期的であること, 及び同位相の電圧給電であることを条件に検討した. しかしながら, 宇宙太陽光利用システムに搭載される周期的アレーアンテナは, 運用中に破損して一部が動作しなくなる恐れがあり, アレーの周期性が必ずしも保証されない. また, ビーム制御も狭い範囲に限られるが, 各素子の給電位相も必ずしも同位相ではない. そのため, 周期的アレーアンテナの一部の素子を抜いた状態及び位相差付の電圧給電を条件とした場合, インピーダンス拡張法の有効性について検討すると共に, 1 次元アレーから 2 次元ダイポールアレーへとインピーダンス拡張法の適用範囲を広げていく必要がある.

References

- [1] A.K.M. Baki, Kozo Hashimoto, Naoki shinohara, Tomohiko mitani, and Hiroshi Matsumoto, "Isosceles-trapezoidal-distribution edge tapered array antenna with unequal element spacing for solar power satellite," IEICE Trans. Commun., vol.E91-B, no.2, pp.527-535, Feb. 2008.
- [2] R.F. Harrington, Field Computation by Moment Methods, New York, Macmillan, 1968.
- [3] J.H. Richmond and N.H. Greay, "Mutual impedance of nonplanar-skew sinusoidal dipoles," IEEE Trans. Antennas and Propagat., vol.23, no.5, pp.412-414, May 1975.
- [4] Qiang Chen, Qiaowei Yuan, Kunio Sawaya, "Fast algorithm for solving matrix equation in MoM analysis of large-scale array antennas," IEICE Trans. Commun., vol.E85-B, no.11, pp.2482-2488, Nov. 2002.
- [5] Qiang Chen, Qiaowei Yuan, Kunio Sawaya, "Convergence of SOR in MoM analysis of array antenna," IEICE Trans. Commun., vol.E88-B, no.5, pp.2220-2223, May 2005.
- [6] T.K. Sarker and S.M. Rao, "The application of the conjugate gradient method for the solution of electromagnetic scattering from arbitrarily oriented wire antennas," IEEE Trans. Antennas Propag., vol.32, no.4, pp.398-403, April 1984.
- [7] T.K. Sarker, "The conjugate gradient method as applied to

- electromagnetic field problems," IEEE Antennas Propagation Society Newsletter, vol.28, no.4, pp.4-14, Aug. 1986.
- [8] R. Coifuman, V. Rokhlin, and S. Wandzura, "The fast multipole method for the wave equation: a pedestrian prescription," IEEE Antennas and Propagat. Mag. vol.35, no.3, pp.7-12, June 1993.
- [9] V. Rokhlin, "Rapid solution of integral equations of scattering theory in two dimension," J. Comput. Phys., vol.86, no.2, pp.414-439, Feb. 1990.
- [10] J.M. Song and W.C. Chew, "Multilevel fast-multipole algorithm for solving combined field integral equations of electromagnetic scattering," Microw. Opt. Technol. Lett., vol.10, no.1, pp.14-19, Sept. 1995.
- [11] 瀬在俊浩, 久田安正, ザイ・フイチン, 陳強, 澤谷邦男, "CG-FMM-FFT 法によるモーメント法的高速化・メモリ低減化," 信学技報, SPS2007-05, pp.7-14, July 2007.
- [12] Huiqing Zhai, Qiang Chen, Qiaowei Yuan, Kunio Sawaya, Changhong Liang, "Analysis of large-scale periodic array antennas by CG-FFT combined with equivalent sub-array preconditioner," IEICE Trans. Commun., vol.E89-B, no.3, pp.922-928, March 2006.
- [13] Huiqing Zhai, Qiaowei Yuan, Qiang Chen, Kunio Sawaya, "Preconditioners for CG-FMM-FFT implementation in EM analysis of large-scale periodic array antennas," IEICE Trans. Commun., vol.E90-B, no.3, pp.707-710, March 2007.