

[共同研究成果]

ベクトル型スーパーコンピュータを用いた 八木・宇田アンテナアレーの高利得化

今野 佳祐[†], 陳 強[†]

東北大学大学院工学研究科 通信工学専攻[†]

1 まえがき

電磁波を用いた無線電力伝送に関する研究は 20 世紀初頭から行われており、長い歴史がある [1]-[3]。無線電力伝送は、近傍界を用いたものと遠方界を用いたものに大別される。近傍界を用いた無線電力伝送は高効率だが伝送距離が短く、遠方界を用いた無線電力伝送は低効率だが伝送距離が長いという特徴がある。また、近傍界を用いた無線電力伝送では送受電アンテナ間の整合が重要な一方、遠方界を用いた無線電力伝送ではアンテナの高利得化が重要になる。近傍界を用いた無線電力伝送は、マサチューセッツ工科大学のグループの研究により、非常に高い効率で電力伝送可能なことが実証されて以来、盛んに研究されている [4]。その一方で、遠方界を用いた無線電力伝送は、宇宙太陽光利用システムなどの送受電システムとしての応用が古くから期待されていた [5]-[7]。

遠方界を用いた無線電力伝送では、アンテナの高利得化を図るために、アレーアンテナが用いられる。例えば、宇宙太陽光利用システムでは、太陽電池で発電した電力を地上に送電するために、数億素子規模のアレーアンテナが利用されることが想定されており、その給電分布の研究 [8] や数値解析法の研究 [9], [10] がこれまでに行われてきた。一般に、アンテナの利得はその大きさとトレードオフの関係にあるので、高利得のアンテナは大型のアンテナになる。その一方で、アンテナの大きさが無制限に許容されることは実用上まれであり、限られた空間で利得が最大のアンテナを実現することが求められる。

本報告では、遠方界を用いた無線電力伝送用のアレーアンテナの高速な設計法を提案する。提案法は、アレーアンテナの大きさを制約条件とし、最大の指向性利得を有するアンテナを実現することができる。アンテナ素子は八木・宇田アンテナとし、アレーアンテナが $0.2 \text{ m} \times 0.2 \text{ m} \times 0.2 \text{ m}$ の立方体に収まるように設計する。設計したアレーアンテナを遠方界無線電力伝送システムの受信アンテナとして用い、1 素子当たりの受信電力を明らかにすることで、整流回路の設計指針を得る。

2 設計法

設計する八木・宇田アレーアンテナの構造を図 1 に示す。動作周波数は 2.45 GHz であり、波長はおよそ 12cm であるから、放射器、導波器、反射器の素子長はいずれも 6cm 前後となる。一般的に、反射器は半波長以上の長さとなるから、 $0.2 \text{ m} \times 0.2 \text{ m} \times 0.2 \text{ m}$ の立方体にアレーアンテナ全体を収めるためには、E 面 (図 1 の yz 面) の八木・宇田アンテナ素子数は高々 3 素子が限界であ

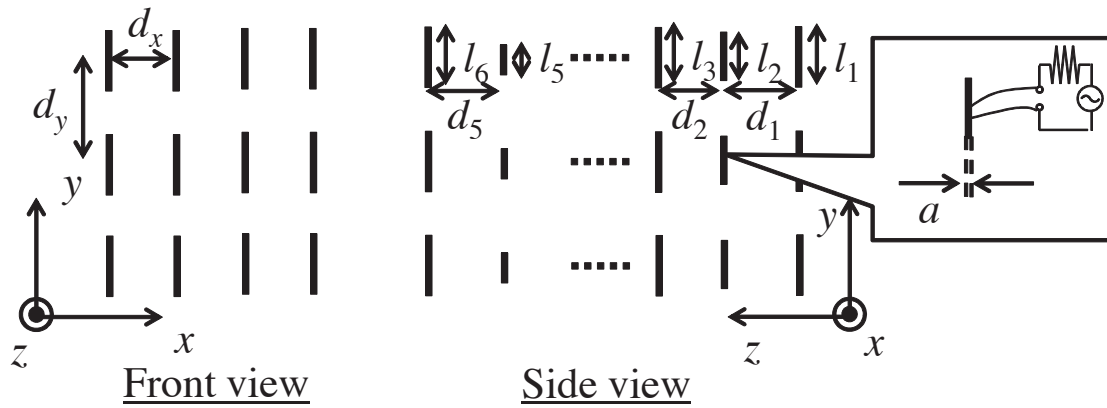


図 1: 4 × 3 素子の八木・宇田アレーアンテナ.

る。その一方で、H面(図1の xz 面)の八木・宇田アンテナ素子数は素子間距離次第で自由に変わられるが、素子同士が近接しすぎると開口効率が低下したり、素子間相互結合によってインピーダンスの不整合が生じるという問題がある。したがって、限られた寸法内で最大の開口効率が実現でき、素子間相互結合の影響もなるべく低減できる構造が望ましい。そこで本報告は、立方体の両側面と内部にそれぞれ2素子、合計4素子の八木・宇田アンテナ素子が等間隔で配置された構造を考える。アンテナの素子間隔は $0.2/3\text{ m}(\approx 0.67\lambda)$ であり、一般的なアレーアンテナの素子間隔($0.5\lambda \sim 1\lambda$)の範囲に収まる。また、両側面に配置したアンテナの開口は立方体の内部だけでなく外部にも存在するので、立方体の内部にアンテナを配置するという制約を満たしつつ、立方体の側面積から算出される開口を上回る実効開口を持たせることが可能になる。八木・宇田アンテナ1素子あたりの導波器は4本、放射器と反射器はそれぞれ1本とした。

このような構造を持つ4 × 3素子の八木・宇田アレーアンテナは、全ての八木・宇田アンテナ素子が同一であるならば、導波器、放射器および反射器の素子長に関するパラメータが $l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, l_6$ の6つ、それらの素子間距離が d_1, d_2, d_3, d_4, d_5 の5つある。したがって、4 × 3素子の八木・宇田アレーアンテナの設計は、これら11変数の最適化問題と捉えることができる。このような多変数のアンテナ構造の最適化問題は、アンテナ構造の候補が変数に対して指数関数的に増加するのに加え、アンテナ性能を求めるのに Full-wave の数値解析を何度も繰り返し解く必要があるため、現実的に解くのが非常に困難である。したがって、このような最適化問題を解くには何らかの高速化が必要である。本報告では、最適化アルゴリズムは用いずに総当たりの数値計算を行う一方、電磁界数値解析はベクトル型スーパーコンピュータ SX-ACE で高速化して実行する。

本アンテナは遠方界を用いた無線電力伝送用のアンテナであるため、最適化のための目的関数は指向性利得とし、その最大化を行うこととする。八木・宇田アンテナ素子の導波器、放射器、反射器の素子長とそれらの素子間隔は、離散的な値の候補から選ぶこととし、素子長は $0.02, 0.03, 0.04, 0.05, 0.06\text{ m}$ の5通り、素子間隔は $0.01, 0.02, 0.03\text{ m}$ の3通りとした。一般的な八木・宇田アンテナの素子長は半波長前後、素子間隔は $1/4$ 波長前後なので、このような素子長と素子間隔の候補の与え方は妥当である。その一方で、 $5^6 * 3^5 = 3,796,875$ とおおよそ400万通りに上る素子長と素子間隔の組

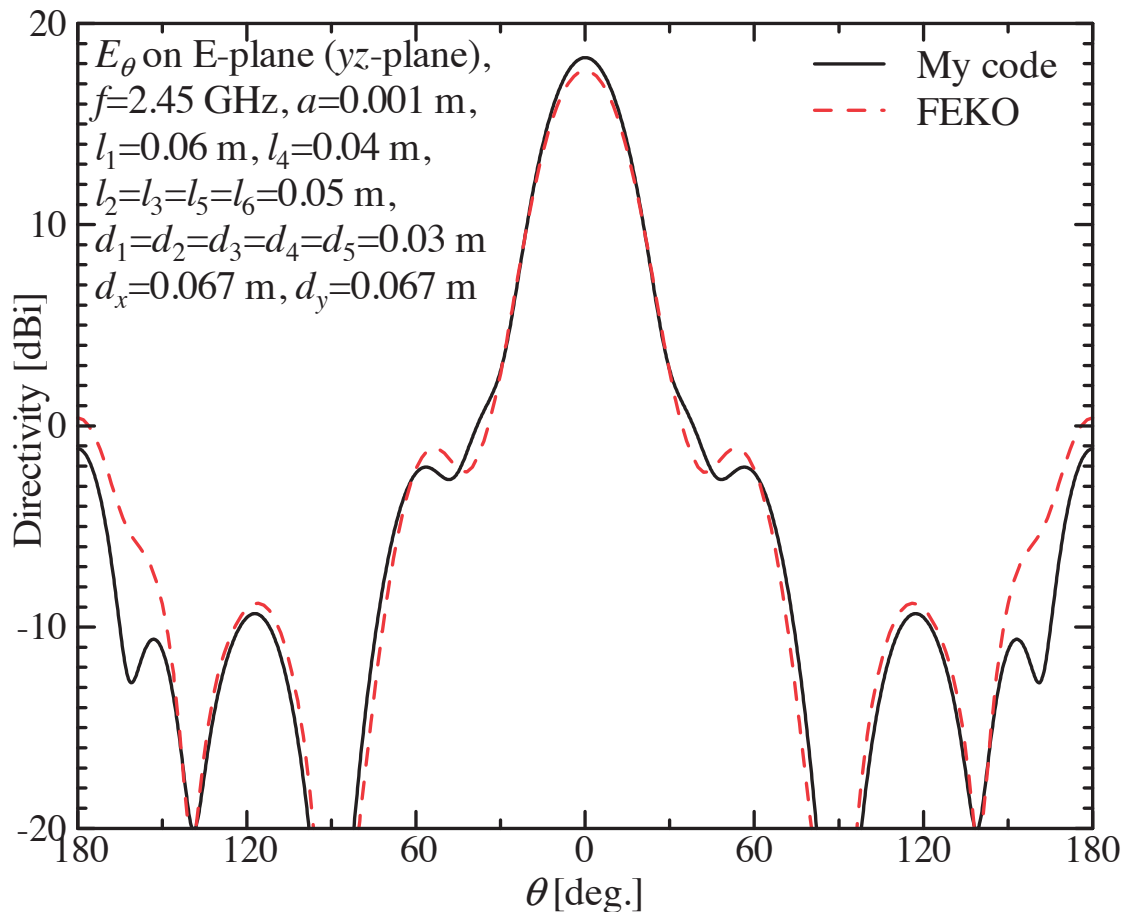


図 2: 最適化した 4×3 素子の八木・宇田アレーアンテナの指向性利得.

み合わせに対応したアレーアンテナを高速に数値解析するため、Richmond のモーメント法 [11], [12] の自己・相互インピーダンス行列の数値計算部分をベクトル化したのに加え、アンテナの電流分布を求める部分にベクトル演算向き共役勾配法を用いた [13]-[15]. 素子長と素子間隔の値は逐次的に更新し、指向性利得が最大となるような素子長・素子間隔を最終的に出力する.

3 数値計算結果

最適化した 4×3 素子の八木・宇田アレーアンテナの指向性利得を図 2 に示す. 数値計算結果の妥当性を示すため、商用の電磁界シミュレータである FEKO で同じモデルを数値解析して得られた指向性利得も示す. 指向性利得の最大値は約 17.6 dBi(FEKO), 18.3 dBi(My code)であった. 指向性利得から計算した実効開口効率は約 194%であり、効率が 100%を超えていることから、八木・宇田アンテナを側面に配置して開口を立方体の外にまで広げた効果が見られる. 各素子の動作インピーダンスは、実部が 29~40, 虚部が -14~-18 程度の範囲内に収まった. 各素子の動作インピーダンスがこの範囲に収まっていれば、整流回路を適切に設計することでアンテナ-整流回路間の整合を保つことが可能である.

ベクトル型スーパーコンピュータ SX-ACE を用いて数値計算を実行するのに要した時間は、1

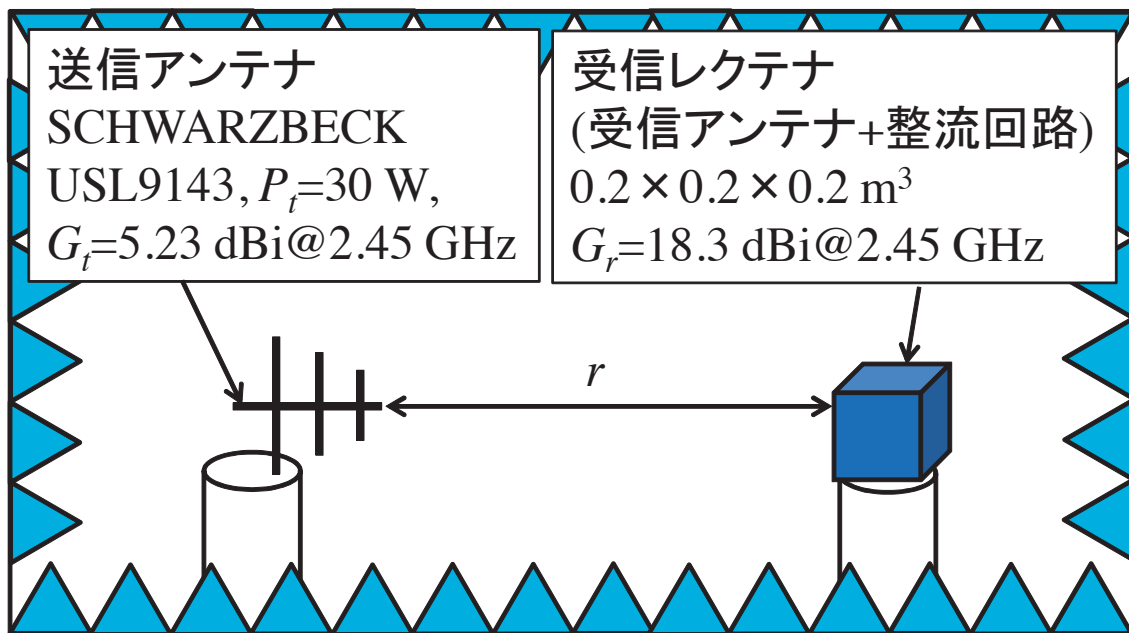


図 3: 遠方界無線電力伝送システムの一例.

ノード (4 並列) で合計 174,897 秒, ベクトル演算率は 99.3%であった. 数値計算 1 回当たりの時間は 0.04 秒ほどと非常に短いものの, 400 万回近い電磁界数値解析を実行したため, 設計にはおよそ 50 時間を要した. 市販のパソコンだとこの数十倍~数百倍の時間がかかってしまうので, 多変数のアンテナの最適化問題において, ベクトル型スーパーコンピュータは強力な高速化ツールに成り得ることが分かる.

4 受信電力

無線電力伝送システムには, 受信側にアンテナと整流回路からなるレクテナを配置する. レクテナは, アンテナで受信した高周波電力を整流回路で直流電力に変換することができる. 整流回路は非線形素子であるダイオードを含むので, 整流回路の整流効率は, 周波数だけでなくその入力電力の関数にもなる. したがって, 高い整流効率を実現するためには, レクテナが受信する電力を予め見積もっておく必要がある.

そこで実際の遠方界無線電力伝送システムを想定し, 設計したアレーアンテナの各素子の受信電力を求める. 図 3 に, 遠方界無線電力伝送システムの一例を示す. この図に示す系は, 2017 年 9 月に電子情報通信学会の無線電力伝送研究会が主催した無線電力伝送コンテストで実際に用いられたものである. 送信アンテナは SCHWARZBECK USL9143 であり, 受信アンテナは本報告で設計した 4×3 素子の八木・宇田アレーアンテナである. 送受信アンテナ間距離は 1m, 送信電力は 30W である.

フリスの伝達公式から, 送受電アンテナ間での不整合を無視すれば, 受信電力 P_r は以下の式で表される.

$$P_r = \left(\frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 G_r G_t P_t \quad (1)$$

ここで、 λ は波長、 r は送受信アンテナ間距離、 G_r は受信アンテナの絶対利得、 G_t は送信アンテナの絶対利得、 P_t は送信電力である。(1) 式に $G_r = (10^{1.83})/12 = 5.63$, $G_t = 10^{0.523} = 3.33$, $P_t = 30$, $\lambda = 0.122$, $r = 1$ を代入すると、 $P_r \approx 53$ mW を得る。この値が1素子当たりの受信電力であり、この入力電力を目安として整流回路の設計をすればよいことが分かった。

5 まとめ

本報告では、遠方界を用いた無線電力伝送システム用の受信アンテナの高速設計法を提案した。提案手法は、素子間相互結合を厳密に評価しながらアレーアンテナを設計する手法であり、反復法とベクトル型スーパーコンピュータを併用することによって高速化を実現している。一定の容積に収まるという条件下で、八木・宇田アンテナ素子からなる12素子アレーの設計を行った結果、200%近い開口効率が得られた。遠方界無線電力伝送システムを構築し、素子当たりの受信電力を見積もり、整流回路設計のための指針を得た。

謝辞

本研究成果は、東北大学サイバーサイエンスセンターのスーパーコンピュータ SX-ACE を用いて得られたものである。スタッフをはじめ、関係各位に深く感謝する。

参考文献

- [1] R. Reinhold, “Der empfang elektrischer wellen in der drahtlosen telegraphie” (“The receipt of electric waves in the wireless telegraphy”), *Annalen der Physik* IV, 25, 1908, pp. 446-466.
- [2] N. Tesla, “The transmission of electrical energy without wires,” *Electrical World and Engineer*, March 5, 1904.
- [3] N. Tesla, US Patent No. 1,119,732, 1914.
- [4] A. Kurs, A. Karakis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher, and M. Soljagic, “Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances,” *Science*, vol. 317, no. 5834, pp. 83-86, July 2007.
- [5] P.E. Glaser, “Power from the sun: Its future,” *Science*, vol.162, pp.857-861, Nov. 1968.
- [6] P.E. Glaser, “An verview of the solar power satellite option,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol.40, no.6, pp.1230-1238, June 1992.
- [7] J. O. McSpadden and J. C. Mankins, “Space solar power programs and microwave wireless power transmission technology,” *IEEE Microw. Mag.*, vol. 3, no. 4, pp. 46-57, Dec. 2002.

- [8] A.K.M. Baki, K. Hashimoto, N. Shinohara, T. Mitani, and H. 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.
- [9] K. Konno, Q. Chen, K. Sawaya, and T. Sezai, “Analysis of huge-scale periodic array antenna using impedance extension method,” *IEICE Trans. Commun.*, vol.E92-B, no.12, pp.3869-3874, Dec. 2009.
- [10] K. Konno, Q. Chen, K. Sawaya, and T. Sezai, “Statistical analysis of huge-scale periodic array antenna including randomly distributed faulty elements,” *IEICE Trans. Commun.*, vol.E94-C, no.10, pp.1611-1617, Oct. 2011.
- [11] J. H. Richmond and N. H. Geary, “Mutual impedance of nonplanar-skew sinusoidal dipoles,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 23, no. 3, pp. 412-414, May 1975.
- [12] C. W. Chuang, J. H. Richmond, N. Wang and P. H. Pathak, “New expressions for mutual impedance of nonplanar-skew sinusoidal monopoles,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 38, no. 2, pp. 275-276, Feb. 1990.
- [13] M.R. Hestenes and E. Stiefel, “Methods of conjugate gradients for solving linear systems,” *J. Res. Nat. Bur. Stand.*, vol.49, no.6, pp.409-436, Dec. 1952.
- [14] T.K. Sarkar, K.R. Siarkiewicz, and R.F. Stratton, “Survey of numerical methods for solution of large systems of linear equations for electromagnetic field problems,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol.AP-29, no.6, pp.847-856, Nov. 1981.
- [15] T.K. Sarkar 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.AP-32, no.4, pp.398-403, April 1984.