

デジタル移相器損失を考慮した 宇宙太陽発電所送電システムの高効率化

田中 俊二[†] 三谷 友彦[‡] 蛭原 義雄[†]

[†] 京都大学大学院工学研究科 〒615-8530 京都市西京区京都大学桂

[‡] 京都大学生存圏研究所 〒611-0011 宇治市五ヶ庄

E-mail: [†] {tanaka, ebihara}@kuee.kyoto-u.ac.jp, [‡] mitani@rish.kyoto-u.ac.jp

あらまし 宇宙太陽発電所構想では、送電システムとして大規模フェーズドアレイアンテナの使用が想定されている。本研究の目的は、デジタル移相器損失を考慮したフェーズドアレイアンテナからの送電電力を最大化することである。本研究では、送電電力最大化問題を組み合わせ最適化問題として定式化し、短時間で近似解を導くためのビーム形成アルゴリズムを開発した。また、4ビットデジタル移相器を製作し、1次元12素子等間隔フェーズドアレイアンテナによるビームパターン測定を行った。計算機実験だけではなく実証実験からも開発アルゴリズムの有効性を確認した。

キーワード フェーズドアレイアンテナ, 移相器損失, 組み合わせ最適化問題, 実回転定理

Study on Highly-Efficient Transmitting System Including Digital Phase Shifter Loss for Solar Power Satellites

Shunji TANAKA[†] Tomohiko MITANI[‡] and Yoshio EBIHARA[†]

[†] Graduate School of Engineering, Kyoto University Kyoto daigaku-Katsura, Nishikyo-ku, Kyoto, 615-8530 Japan

[‡] Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University Gokasho, Uji-shi, Kyoto, 611-0011 Japan

E-mail: [†] {tanaka, ebihara}@kuee.kyoto-u.ac.jp, [‡] mitani@rish.kyoto-u.ac.jp

Abstract A large-scale phased array antenna will be adopted as a transmitting system of solar power satellites. The objective of the present study is to maximize microwave power transmitted from a phased array antenna including lossy digital phase shifters. In the present study, we formulated this problem as a combinatorial optimization problem. Then we developed an efficient beamforming algorithm to obtain a near-optimal solution of the problem in a short computational time by the real rotation theorem. Also, we fabricated 4-bit digital phase shifters, and we conducted beam pattern measurements of a 1-dimensional 12-elements uniformly-spaced phased array antenna. We confirmed effectiveness of our developed algorithm through the experimental measurements and results as well as numerical simulations.

Keyword Phased Array Antenna, Phase Shifter Loss, Combinatorial Optimization Problem, Real Rotation Theorem

1. はじめに

近年の宇宙太陽発電所構想においては、アンテナ素子を平面上に多数配置したフェーズドアレイアンテナを送電システムとして無線電力伝送を行うことが最有力視されている。フェーズドアレイアンテナでは、各アンテナ素子から放射される電界の合成によりビームパターンが決定される。よって、各アンテナ素子に移相器を挿入する等により出力位相を能動的に制御することにより、受電方向に対して送電電力が最大となるようなビームパターンを形成することができる。宇宙太陽発電所構想においては、離散的な位相値を出力するデジタル移相器の使用が検討されている。

従来のフェーズドアレイアンテナ研究においては、

アンテナ端での励振振幅が全てのアンテナ素子において等振幅あるいは決まった振幅分布をもつような条件でのビームパターン研究がなされている。一方、移相器には挿入損失が存在し、この挿入損失の度合いは移相器が出力する位相値に依存することが多い。そこで、移相器損失も含めた各アンテナ素子での通過損失量を補償するために、リミッタ回路やAGC(Automatic Gain Control)回路を用いて振幅調整がなされる。このような回路調整により、アンテナ端での励振振幅を所望の値となるように調整し、従来研究に沿ったビームパターンを形成することができる。

一方、宇宙太陽発電所の最重要目的の一つは、できる限り低損失高効率で電力を無線送電することである。

リミッタ回路や AGC 回路等の挿入は、これらの回路自身が電力損失源となるため、送電効率の更なる低下を招くだけでなく、宇宙システムでの損失量増加による熱制御システムへの負担増にも繋がる。つまり、宇宙太陽発電所におけるフェーズドアレーアンテナは、できる限り上述の調整回路を用いない高効率かつ簡素なシステムであることが望ましい。

そこで本研究の目的を、デジタル移相器による電力損失を考慮したフェーズドアレーアンテナにおけるマイクロ波無線電力伝送の送電電力最大化とする。フェーズドアレーアンテナにおいて望ましいビームパターンを形成する問題は、適切な目的関数を設定することにより、励振位相を決定変数とした最適化問題として扱うことができる。過去には、アナログ移相器の損失を考慮したフェーズドアレーアンテナのビームパターン研究[1]がなされているが、本研究で取り扱う移相器はデジタル移相器とする。取り扱うデジタル移相器の条件として、位相変化を伴わない場合には電力損失が発生せず、位相変化を伴う場合には電力損失が生じるものとする。

本研究では、この組合せ最適化問題を部分問題に分解し、この部分問題の近似解を短時間で解くためのビーム形成アルゴリズム開発した。本報告では、まずフェーズドアレーアンテナの無線電力最大化問題の定式化、および開発したアルゴリズムについて述べる。次に、開発アルゴリズムを適用した 1 次元 12 素子等間隔フェーズドアレーアンテナによる実証実験について述べる。なお、本報告は文献[2-5]に記した学会等の発表内容をまとめたものである。

2. フェーズドアレーアンテナの無線電力最大化問題の定式化

本報告では、簡単のために図 1 に示す 1 次元等間隔フェーズドアレーアンテナについて無線電力最大化問題を定式化する。2 次元フェーズドアレーアンテナについては文献[5]を参照されたい。

アンテナ素子数を N とする。各アンテナ素子は無指向性アンテナとし、アンテナ間隔 d の等間隔配列とする。各アンテナ素子は m ビットのデジタル移相器により位相制御される。このデジタル移相器は 2 値の位相値を出力する 1 ビット移相器を m 段組み合わせたものであり、 $0^\circ \sim 360^\circ$ において $180^\circ/2^{m-1}$ 毎の離散的な位相値が出力されるものとする。例えば 2 ビットのデジタル移相の場合、 0° もしくは 180° を出力する 1 ビット移相器と、 0° もしくは 90° を出力する 1 ビット移相器を多段接続することにより実現される。この

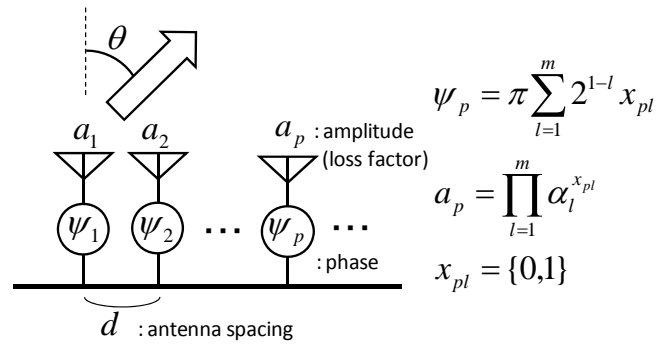


図 1 1 次元等間隔フェーズドアレーアンテナの配置図

ようなデジタル移相器において、各 1 ビット移相器で移相を行う毎に電力損失が生じるものと仮定し、 l 段目 ($1 \leq l \leq m$) の 1 ビット移相器で移相を行った際の減衰量を α_l ($\alpha_l < 1$) とする。例えば 2 ビット移相器の場合、移相量 0° では損失は発生せず、移相量 180° での損失量は α_1 、移相量 90° での損失量は α_2 、移相量 270° での損失量は $\alpha_1\alpha_2$ で与えられるものとする。このような 1 次元フェーズドアレーアンテナにおいて、方位角 θ 方向に対する無線伝送電力最大化問題(P)は次式のように記述できる。

$$A = \max_x E^*(\mathbf{x}, \theta)E(\mathbf{x}, \theta),$$

$$\text{s.t. } \mathbf{x} = \{x_{pl} \mid x_{pl} = 0,1\}, \quad 1 \leq p \leq N \quad (1)$$

$$E(\mathbf{x}, \theta) = \sum_{p=1}^N \left\{ \prod_{l=1}^m \alpha_l^{x_{pl}} \cdot \exp\left[j \frac{2\pi d}{\lambda} (p-1) \sin \theta + j\pi \sum_{l=1}^m 2^{l-1} x_{pl} \right] \right\} \quad (2)$$

ここで E は電界強度であり、*は複素共役を表す。 x_{pl} は、 p 番目のアンテナ素子における l 段目の 1 ビット移相器を移相するかどうかを決める 0-1 決定変数であり、 $x_{pl} = 0$ の時には移相せず、 $x_{pl} = 1$ の時に移相が行われる。また j は虚数単位であり、 λ は送電マイクロ波の波長である。ここで、 $E^*(\mathbf{x}, \theta)E(\mathbf{x}, \theta) = |E(\mathbf{x}, \theta)|^2$ であるから、問題(P)の最適解は次の問題(P')

$$A' = \max_x |E(\mathbf{x}, \theta)| \quad (3)$$

よって、解くべき問題はアンテナ素子数 N と移相器ビット数 m の積に応じた 0-1 決定変数をもつ組合せ最適化問題となる。

この問題(P')の最適解は全列挙によって求めることができるが、その際の計算量は $O(2^{mN})$ となる。つまり、宇宙太陽発電所送電システムのように膨大なアンテナ素子数をもつフェーズドアレーアンテナの場合、最適解を求めるための計算量は途轍もない量となり、最適解を求めることは現実的に困難である。そこで、この組み合わせ最適化問題を実回転定理[6]を適用することで部分問題に分解し、この部分問題の近似解を短時間で求めるビーム形成アルゴリズム[5]を開発した。

3. 無線電力最大化問題のビーム形成アルゴリズムの開発

実回転定理とは、任意の複素数 z の絶対値は以下の式で求められるという定理である。

$$|z| = \max_{0 \leq \xi < 2\pi} \operatorname{Re}\{z \cdot \exp(j\xi)\} \quad (4)$$

式(4)を式(2)の $E(\mathbf{x}, \theta)$ を適用し、式(3)に代入すると、問題(P')は最終的に以下の問題(D)に書き換えることができる。

$$A' = \max_{0 \leq \xi < 2\pi} \sum_{p=1}^N \left\{ \prod_{l=1}^m \alpha_l^{x_{pl}} \cdot \cos\left(\frac{2\pi d}{\lambda} (p-1) \sin \theta + \pi \sum_{l=1}^m 2^{l-1} x_{pl} + \xi\right) \right\} \quad (5)$$

式(5)は、組み合わせ最適化問題(P')がアンテナ素子毎に独立した部分問題(D)に置き換えられたことを表す。ここで、問題(D)の最適解を求めることは現実的には困難であるが、次式に示す離散的な値を ξ に適用することにより問題(D)の近似解を求めることは可能である。

$$\xi \in \Xi = \{2\pi k / K \mid k = 0, 1, \dots, K-1\} \quad (6)$$

ここで K は $0 \leq \xi < 2\pi$ における ξ の刻み幅を決定するパラメータである。 K の値が十分大きければ、最適解と比較して遜色ない近似解を得られることは確認済み[5]である。以上が開発したビーム形成アルゴリズムである。

開発アルゴリズムの最も注目すべき点は、式(3)から式(5)への部分問題分解により、 A' を求めるための決定変数が x_{pl} から ξ に変わったことである。つまり、問題(P')では全てのアンテナ素子が 0-1 決定変数の要素として含まれているため、アンテナ素子数が増加すると計算量が指数関数的に増大する。一方、問題(D)ではアンテナ素子は決定変数に含まれておらず、アンテナ素子数に依存する計算量は級数和計算の部分のみである。よって、問題(D)の計算量は $O(KN2^m)$ となり、アンテナ素子数増加による計算量の増加は線形的な影響に留まる。

一例として、次節の実証実験で使用した 4 ビット移相器 12 素子 1 次元アレーアンテナにおける送電電力最大化問題の計算量について議論する。問題(P')の最適解を求めるための計算量は $2^{mN} = 2^{4 \cdot 12} \approx 3 \times 10^{14}$ のオーダーとなる。一方、問題(D)の近似解を求めるための計算量は、 $K = 3600$ (ξ の刻み幅: 0.1°) とした場合において、

$KN2^m = 3600 \cdot 12 \cdot 2^4 \approx 7 \times 10^5$ のオーダーとなり、問題(P')の最適解を求めるときの計算量よりも 100 万分の 1 程度の計算量で済むことが分かる。商用ベースの宇宙太陽発電所送電システムのアンテナ素子数は数億程度であり、開発アルゴリズムによる計算量低減が極めて重要であることは自明である。

4.1 次元 12 素子フェーズドアレーアンテナによる開発アルゴリズムの有効性実証実験

開発したビーム形成アルゴリズムの有効性を実証するために、1 次元 12 素子フェーズドアレーアンテナによるビームパターン測定実験を行った。

まず、本実験に使用するための 4 ビット移相器を製作した。製作した 4 ビット移相器は、Hybrid-coupled 型の 180° 移相器および 90° 移相器、Loaded-line 型の 45° 移相器および 22.5° 移相器により構成され、これらの 1 ビット移相器を多段接続して使用する。各 1 ビット移相器には PIN ダイオード(Avago 製 HSMP-4890)が装着されており、PIN ダイオードの on/off によって所望の位相が変化する。各移相器の PIN ダイオード on/off 時の通過損失および on/off 間の位相差を表 1 に示す。表内の値は各 1 ビット移相器を 12 個実測した際の平均値である。表 1 に示す通り、今回製作した 4 ビット移相器は、全ての 1 ビット移相器において PIN ダ

イオード on 時の通過損失が off 時の通過損失よりも大きくなるように設計し製作した。したがって、製作した 4 ビット移相器は 2 節で定義した損失量の扱い方と一致している。

表 1 製作したデジタル移相器の PIN ダイオード on/off 時の通過損失および on/off 間の位相差の測定値 (製作した 12 個の平均値)

移相量の設計値	通過損失 (ダイオード off 時)	通過損失 (ダイオード on 時)	on/off 間の位相差
-22.5°	-0.38dB	-0.39dB	-22.2°
-45°	-0.41dB	-1.12dB	-44.1°
-90°	-0.91dB	-1.19dB	-90.3°
-180°	-1.19dB	-1.40dB	-181.8°

この 4 ビット移相器を用いた 1 次元 12 素子フェーズドアレイアンテナの実証実験を電波暗室内で実施した。図 2 に実証実験概略図を示す。アンテナは円形マイクロストリップアンテナを用い、周波数は 2.45GHz、アンテナ間隔は 0.08m、フェーズドアレイアンテナから受信ホーンアンテナ (利得 16.1dBi) までの距離は 6m とし、送電マイクロ波周波数は 2.45GHz とした。

測定結果の一例として、ビーム方向を +5° 方向および -5° 方向としたときの 1 次元 12 素子フェーズドアレイアンテナのビームパターン結果を図 3 示す。図 3(a) は +5° 方向、図 3(b) は -5° 方向のビームパターン結果であり、図中の ○ は実測値、実線は計算値である。また、図中の赤色は開発アルゴリズムを使用した場合のビームパターン結果であり、青色は等振幅フェーズドアレイアンテナと仮定した際に以下の式で得られる位相値を各アンテナ素子に与えた場合のビームパターン結果である。

$$\psi_p = -\frac{2\pi d}{\lambda}(p-1)\sin\theta \quad (7)$$

従来の宇宙太陽発電所送電システムに関連するフェーズドアレイアンテナ研究では、位相決定方式として式 (7) を用いる場合がほとんどである。また、各図においては実測値、計算値ともに開発アルゴリズムにおける最大利得値で規格化している。

図 3(a) より、計算結果、実測結果ともに開発アルゴリズムを用いることでビームパタンの利得が改善されていることが分かる。従来の位相決定方式と比較すると、実測値において 0.53dB の利得増加となった。これは電力比較に換算すると 11% 程度の電力増となる。つまり、開発アルゴリズムを用いることにより、送電システムで発生する恐れのあった 11% 程度の電力損失を改善できたといえる。これは電力伝送を主目的とする

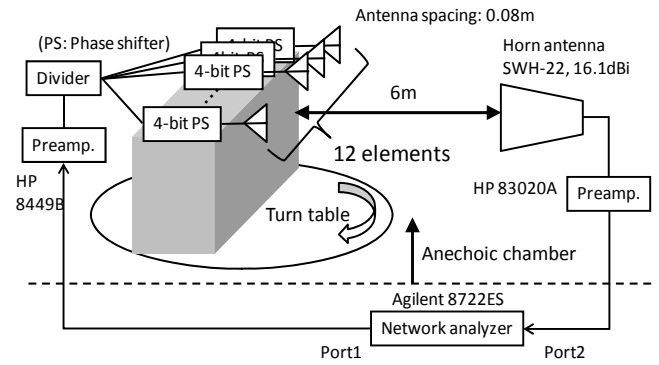


図 2 1 次元 12 素子等間隔フェーズドアレイアンテナの実証実験概略図

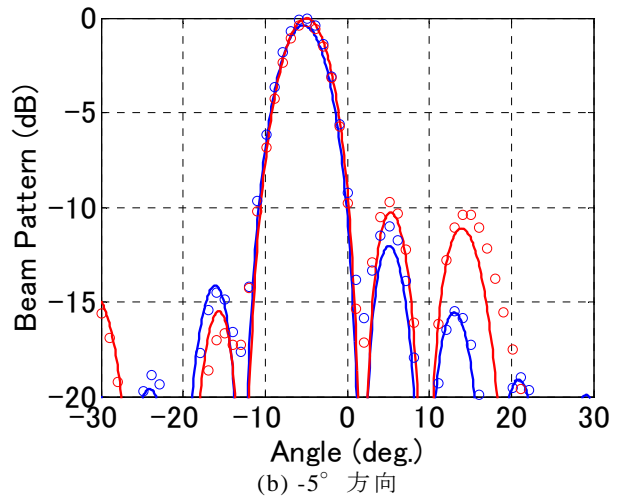
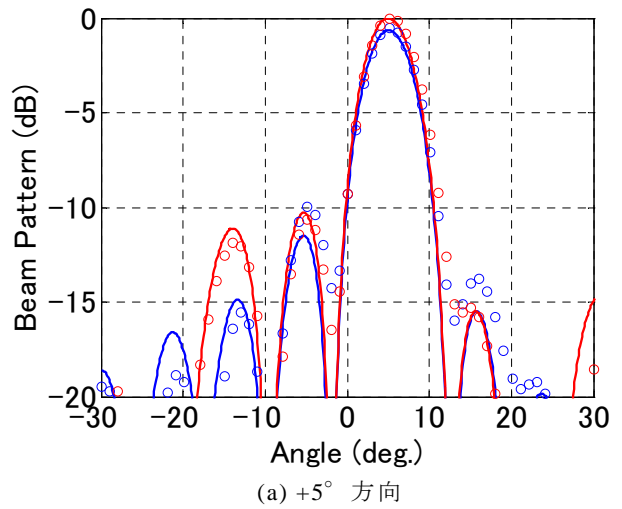


図 3 1 次元 12 素子フェーズドアレイアンテナのビームパターン結果 (○: 実測値, 実線: 計算値, 赤: 開発アルゴリズム使用, 青: 等振幅フェーズドアレイアンテナにおける位相値を使用)

宇宙太陽発電所送電システムにとっては極めて重要な改善である。

一方、図 3(b)に示すように、ビーム方向を反対方向に向けると、計算機実験では開発アルゴリズムの方が高い利得が得られるにもかかわらず、実測値では開発アルゴリズムを用いた場合に 0.23dB の利得減少(5.2%の電力減)となる結果が得られた。この原因としては、製作したデジタル移相器の個体差の影響、およびアンテナ素子の少なさが挙げられる。今回の実証実験で用いたアンテナ素子数が少ないため、各 4 ビット移相器間の個体差が実測において無視できない程度の大きさをもっていたことが考えられる。計算機実験では表 1 に示した 12 個のデジタル移相器の平均値を全てのアンテナ素子に適用してビームパターン計算を実施したが、実証実験で用いたデジタル移相器には個体差による通過損失や移相量の分散が存在する。このため実証実験において個体差の影響による利得減少が発生したと考える。また、図 3 のビームパターン実測結果を得たときに、PIN ダイオードが on 状態(通過損失が増加する状態)となる 1 ビット移相器数を調べた。今回の実証実験における 1 ビット移相器の総数は 12 素子×4 ビット=48 個である。そのうち、+5° 方向にビームを向けた時に PIN ダイオードが on 状態となった移相器数は、開発アルゴリズムを用いた場合に 13 個、従来の位相決定方式を用いた場合に 26 個となった。通過損失が増加する状態となる移相器数が半減しており、このことがビームパターンの利得増加に貢献したことが分かる。一方、-5° 方向にビームを向けた時に PIN ダイオードが on 状態となった移相器数は、開発アルゴリズムを用いた場合に 13 個、従来の位相決定方式を用いた場合に 19 個となった。確かに通過損失が増加する状態となる移相器数は開発アルゴリズムの適用により減少しているものの、+5° 方向にビームを向けた時と比較して位相決定方式による差が小さい。この影響と移相器個体差の影響が組み合わされたことにより、開発アルゴリズムを用いたにもかかわらず実測値のビームパターン利得が減少したと考える。

上述の原因は、今回の実証実験においてアンテナ素子数が少ないことに起因する。よって、大規模フェーズドアレイアンテナにおいては、移相器の個体差影響も緩和されることから、任意のビーム方向での送電電力増は見込めると考える。また計算機実験の方では、どのビーム方向に対しても開発アルゴリズムの有効性が示されることから、今回の実証実験においても全てのデジタル移相器の特性を開発アルゴリズム内に忠実に取り込めばビームパターンの利得減少は発生しないと考える。

5. おわりに

本研究では、宇宙太陽発電所構想のような大規模フ

ェーズドアレイアンテナにおける無線電力最大化問題の近似解を短時間で解くためのアルゴリズムを開発した。また開発アルゴリズムを用いた 1 次元 12 素子等間隔フェーズドアレイアンテナの実証実験を行い、開発アルゴリズムの有効性を示した。一部の实測結果はアンテナ素子数の少なさに起因するビームパターンの利得減少が見られたが、大規模フェーズドアレイアンテナにおいては、この現象は自然に解決されると考える。

本研究で開発したアルゴリズムは、従来の位相決定方式では無条件で発生すると考えられる電力損失を未然に防ぐ効果があり、極めて重要な研究成果である。今後は等振幅分布以外のアンテナ振幅分布をもったフェーズドアレイアンテナでの検討や、サイドローブ低減問題にも取り組む予定である。

6. 謝辞

本研究の一部は、公益財団法人村田学術振興財団平成 21 年度研究助成、および京都市生存圏研究所平成 22 年度生存圏学際萌芽研究により支援されている。

文 献

- [1] M. Fakharzadeh, P. Mousavi, S. Safavi-Naeini, and S. H. Jamali, "The effects of imbalanced phase shifters loss on phased array gain," *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol.7, pp. 192-196, 2008.
- [2] 田中俊二, 三谷友彦, 蛭原義雄, "宇宙太陽光発電の送電アレイアンテナ位相最適化による無線伝送電力最大化," 第 53 回 自動制御連合講演会, pp.1093-1098, Nov. 2010.
- [3] 三谷友彦, 田中俊二, 蛭原義雄, "デジタル移相器損失を考慮したフェーズドアレイアンテナにおける無線伝送電力の最大化," 第 13 回宇宙太陽発電システム(SPS)シンポジウム, pp.75-78, Oct. 2010.
- [4] T. Mitani, S. Tanaka, and Y. Ebihara, "A Study on a Phased Array Antenna including Imbalanced Loss of Digital Phase Shifters for Microwave Power Transmission," 2010 Asia-Pacific Radio Science Conference (AP-RASC '10), CBH-4, Toyama, Japan, Sep., 2010.
- [5] 田中俊二, 三谷友彦, 蛭原義雄, "宇宙太陽光発電の送電アレイアンテナ位相最適化による無線伝送電力最大化," 計測自動制御学会 システム・情報部門学術講演会 2009, 2B4-2, Nov. 2009.
- [6] T. W. Parks, and C. S. Burrus, *Digital Filter Design*, John Wiley & Sons, New York, p.122, 1987.