

## Optimization of uniformly excited phased array for microwave power transmission<sup>1</sup>

Kozo Hashimoto, Souhei Nijima<sup>1</sup>, Masashi Eguchi<sup>2</sup>, Hiroshi Matsumoto

(Research Institute for Space and Atmosphere, Kyoto University)

(<sup>1</sup>Now at Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. <sup>2</sup>Now at Mitsubishi Electric Corp.)

For reduced sidelobes and efficient energy transmission, 10-dB Gaussian tapering is proposed for its transmitting array antenna for SPS (solar power satellite). This causes a problem on the thermal design since elements at the array center are excited more strongly than those near the edge. Antenna radiation patterns are optimized for high transmission efficiency and low sidelobes under a uniformly excited array through a pareto evolutionally algorithm in order to solve the problem. This is expected to contribute cost reduction as well. The optimized results are experimentally confirmed.

---

<sup>1</sup> Presented at the 8th SPS symposium, September 16-17, 2005.

# マイクロ波送電用均一振幅フェーズドアレイのビーム最適化<sup>2</sup>

橋本弘藏,<sup>1</sup>新島 壮平,<sup>2</sup>江口 将史, 松本 紘

(京大生生存圏研究所,<sup>1</sup>現在、三菱重工業株式会社,<sup>2</sup>現在、三菱電機株式会社)

611-0011 宇治市五ヶ庄

[kozo@rish.kyoto-u.ac.jp](mailto:kozo@rish.kyoto-u.ac.jp)

宇宙太陽発電所 (SPS: Solar Power Satellite/Station) においては、サイドローブを減らし、受電点への高効率伝送を実現するために、送電アンテナに 10dB のガウス型の電力分布もたせることが考えられている[1]。送電部をそのように設計すると放熱の難しい中央部で最大の電力となり発熱も多く、温度上昇をもたらすことが問題となっている[2,3]。一方、等振幅励振でサイドローブを低下させる方法はすでに提案されている[4]。マイクロ波送電にとっては伝送効率(送電電力に対するアンテナ面での受電電力の割合)も重要な要素であるため、低サイドローブかつ高伝送効率を満たすアレイアンテナの最適化を行った。

## 1. マイクロ波送電ビームの要件と均一振幅励振の利点

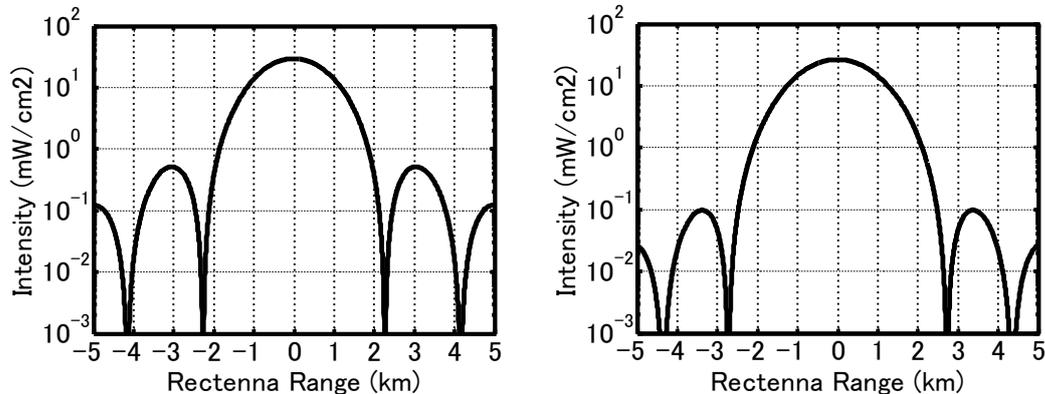


図1 (左)一様振幅励振および(右)10dB ガウス分布で励振した場合のビームパターン

SPS でマイクロ波送電を行うにあたって、様々な条件を満たす必要がある。例えば受電部以外への放射を抑制して電力伝送損失を抑え、人体や通信へ影響を与えないようにすることや、コストをできるだけ抑えて、既存の商用電源価格と同等になるようにすることなどである。送電ビーム形成に関しては高効率でサイドローブを抑制した放射パターンの形成が要請される。アレイアンテナの各素子を等振幅で励振するのは放射効率がよく容易であるが、サイドローブのレベルが中心に比べて-13dB(1/20 の電力)しか下がらない。この場合の受電点における電力密度分布の例を図 1(左)に示す。一方、中心に比べて端で 1/10 となる 10dB ガウス分布で励振すると図 1(右)に示すようにサイドローブが抑制できることが分かる。同時に中心に多くの電力

<sup>2</sup> 第 8 回 SPS シンポジウム, 帝京大学にて 2005 年 9 月 16, 17 日開催。

が集中し、同じ電力を得るためにレクテナを置く地域が狭くなる利点がある。

NASA のリファレンスモデルは送電周波数に 2.45GHz を採用[1]しており、静止衛星軌道上から地上の直径 10km の受電部へ送電するために必要なビームの精度は 0.001° 程度となっている。5.8GHz を採用した場合には、より高い精度が要求される。アレイアンテナの放射パターンは、各素子アンテナの励振位相分布および励振振幅分布によって決まる。通信用のアレイアンテナでのビーム形成では励振位相分布、励振振幅分布ともに可変として使用することが多い。しかし、本研究の対象とするアレイアンテナは電力伝送を目的とするものであり、今回励振振幅分布は均一に固定した状態を仮定する。均一に固定する理由は 3 つあり、(1)放射効率の向上、(2)構造・維持管理の容易さ、(3)熱問題への対策である。それぞれの理由は(1) 各素子アンテナに取り付けられる増幅器は入力によって効率が変わる。そのため、振幅分布を可変にすると増幅器を常に最大効率で使用できなくなることになり、放射効率が落ち、より多くの熱が発生する。(2)サイドローブを抑制するため、各素子の振幅分布を中心ほど大きく端に行くほど小さくする方法と、各素子の振幅を一定にして素子間隔を変化させる方法がある。しかしどちらの方法も構造が複雑となる。低コスト化にはできるだけ均一性が保たれている方が望ましい。(3) 振幅テーパを設けると中心部に熱が集中することになる[3]。排熱の問題は SPS における重要な課題の一つであり、熱の集中は望ましくない。

## 2. SPORTS 5.8 におけるビーム最適化

周波数	5.8GHz
アンテナ数	12×12素子
アンテナ素子	円偏波方形パッチ
移相器	各素子に4ビット
発振器	半導体(FET)
出力	150W (9ユニット)
効率	Approx. 10%
素子間隔	0.6λ (~1.5λ)
寸法	1.4m x 0.9m x 2.0m

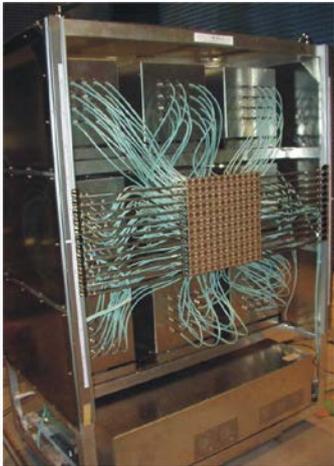


図2 SPORTS5.8 ビーム形成制御サブシステム

### 2.1 SPORTS5.8

ビーム形成の結果を実験的に評価するために、本研究所の SPORTS 5.8 (Space Power Radio Transmission System with 5.8GHz)のビーム形成制御サブシステムを用いた。図 2 に主な仕様と装置の写真を示すが、半導体送信機から各素子に付いた移相器を経由してパッチアンテナアレイに給電し、ビーム形成の実験ができるように設計されている。今回の実験では素子間隔は 0.6 波長とし、電波暗室(METLAB)内で放射パターンを計測した。

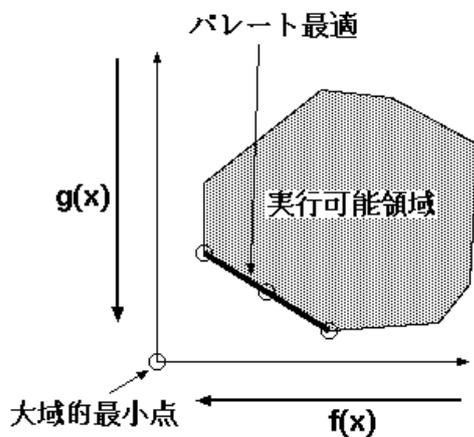


図3 パレート最適解

評価値をとる解を全て含む解集合、言い替えれば、その解より全ての点において優れた解というものがないような解の集合のことである。図3に示すように、実行可能な範囲で大域的な最小点に近い点の軌跡(曲線)が得られる。その中で目的に応じた最適点を選ぶことが出来る。SPEA2(Strength Pareto Evolutionary Algorithm2) [5,6]と呼ばれる多目的GAを用いた。

**SPORTS 5.8** ビーム形成制御サブシステムは均一振幅励振であるので、最適化において変数とするのは各素子アンテナの励振位相 144 個である。パッチアンテナの放射パターンも考慮した計算方法により受電面での放射パターンを計算し、受電部における電力を最大にする関数、およびMSLL(最大サイドローブレベル:Maximum Side Lobe Level)を最小にする関数の二つの目的関数を作成し、これを多目的GAで走らせた。なお、受電部はメインビームの中心から半径50cmの円内としている。また、計算時間の制約上、受電面については4m×4mの領域について101×101のグリッドを設定して計算を行った。

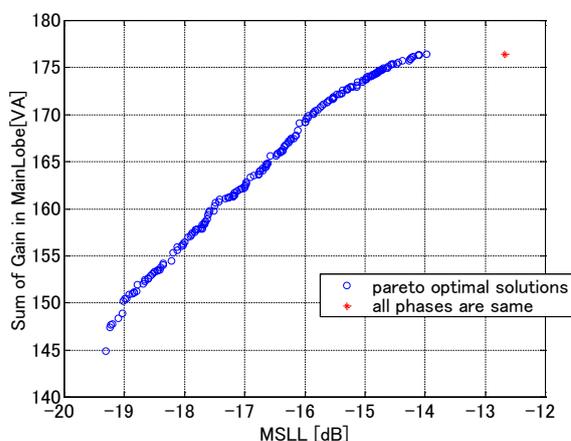


図4 SPORTS5.8の放射パターンの最適化におけるパレート最適解

## 2.1 最適化手法

放射パターンを最適化するにあたって、目的とするのはサイドローブの抑制および受電部における電力の最大化である。そのため、多目的遺伝的アルゴリズム(GA: Genetic Algorithm)を用いた。これはGAが複数の個体を用いて解の探索を行うため、探索の各段階において個体評価における多目的性を直接取り扱うことができ、一度の探索でパレート最適解集合を求めることが可能なためである。パレート最適解集合とは、トレードオフの関係にある各目的に対して様々なバランスで良い

## 2.2 最適化結果

アンテナの真正面をメインビームの中心とするようにした場合の、多目的GAによって得られたパレート最適解を図4に示す。相対的に見るため、受電部の電力については全て同相で励振した場合を基準(100%)に考える。全て同相の場合は図中右上の赤い点にあたり、MSLLは-12.68dBとなっている。得られたパレート最適解のうちでMSLLを最も抑制した解というのは、受電部電力が82.3%で

MSLL=-19.31dB と、全て同相で励振するとき比べて MSLL は 6.6dB 抑えられた。なお、この解の位相分布は中心付近の素子アンテナの位相分布はほぼ一様で、端の方の素子アンテナの位相が大きく変化していた。端の素子アンテナのうちでも、特に角に近い素子アンテナでは中心部の素子アンテナおよびその周辺の素子アンテナと逆位相になっているものがある。これは主に中心部の素子アンテナが受電部電力に大きく寄与し、一方で端の方の素子アンテナは MSLL を抑えるためにサイドローブの電波を打ち消す役割を果たしているものと考えられる。

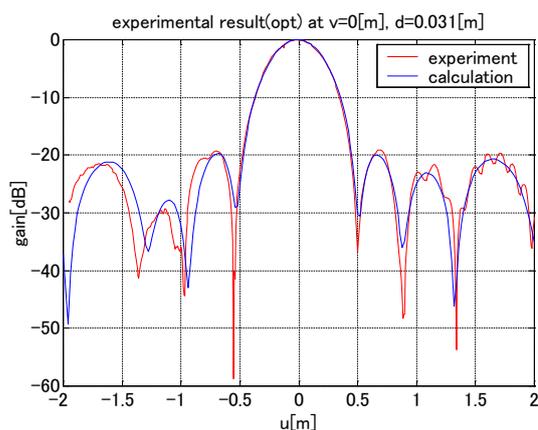


図3 正面にビームを向けた場合に MSLL を最も抑制した解の計算値(青)と測定値(赤)

## 2.3 実験検証結果

最適化で得られた解の位相分布を SPORTS 5.8 に与え、実際にサイドローブを抑制した放射パターンが実現されているかどうか実験を行った。実験に使用した解は MSLL を最もよく抑制した解である。その結果は図3に示すとおりになり、理論計算値と測定値は十分一致して MSLL を抑制できていると言える。また、メインビームの中心を 50cm 横に向けて最適化して得られた

パレート最適解集合のうち、MSLL を最も抑制した解についても実際に SPORTS 5.8 に位相を与えて測定を行った。こちらの結果も十分一致したものが得られ、メインビームの方向を変えた場合でも最適化が十分実現できていることがわかる。

SPORTS 5.8 における放射パターンの最適化を行った結果、期待どおり MSLL を抑制した放射パターンを得ることができた。正面方向だけでなく、ビームの方向を変化させても十分な結果が得られた。これにより、過去に行われてきた同様の手法を用いた研究結果の妥当性が証明されたと言える。また、方形パッチアンテナを用いるにあたって、素子間隔が 0.6 波長のときは相互結合の影響はほとんどないと考えていいと言える。

## 3. 結論

本研究ではまず、均一振幅励振及びソフトウェアレトロディレクティブを採用するという場合を想定し、このときの SPS におけるマイクロ波送電の小規模な実証実験として、SPORTS 5.8 のビーム形成サブシステムにおける放射パターンの最適化をおこなった。

最適化において目的としたのは受電部における電力を最大化することおよびサイドローブを抑制することである。最適化により得られた MSLL を抑制した放射パターンの理論計算値と実際に測定された結果は十分一致し、全て同相で放射するとき比べて MSLL を約 6.6dB 抑制することができた。この結果から、方形パッチアンテナを用いたアレイアンテナで素子間隔が

0.6 波長のときは相互結合の影響はほとんどないということが明らかになった。

## 謝辞

本研究の一部は、21世紀COEプログラム「環境調和型エネルギーの研究教育拠点形成」により支援された。

## 参考文献

- [1] DOE and NASA report, Satellite Power System, Concept Development, and Evaluation Program, Reference System Report, (Oct.1978) (Published Jan.1979).
- [2] 「平成 13 年度宇宙太陽発電システムの研究」成果報告書, 宇宙開発事業団, 2002.
- [3] 藤原暉雄, 篠原真毅, 宇宙太陽発電システムの熱構造面からの一考察, 電子情報通信学会技術研究報告(信学技報), SPS2002-11(2003-03).
- [4] J. F. DeFord and O. P. Gandhi, Phase-Only Synthesis of Minimum Peak Sidelobe Patterns for Linear and Planar Arrays, IEEE Trans. Antennas and Propagation. AP-36, No. 2, 191, 1988.
- [5] E. Zitzler, M.Laumanns, L. Thiele, SPEA2: Improving the Strength Pareto Evolutionary Algorithm, TIK-Report 103, Swiss Federal Institute of Technology (May 2001).
- [6] 廣安他, 多目的遺伝的アルゴリズム (ver 1.2) 仕様書, [http://mikilab.doshisha.ac.jp/dia/research/mop\\_ga/archive/doc/moga\\_doc\\_3\\_5\\_6.pdf](http://mikilab.doshisha.ac.jp/dia/research/mop_ga/archive/doc/moga_doc_3_5_6.pdf), 2002.