

## 博士論文の要約

博士論文題目 大規模マイクロ波電力伝送用フェーズドアレーアンテナの  
段階的サブアレー構成素子数変化による電力分布構成法

著者 片野 将太郎

私は、宇宙太陽光発電システム（SSPS）で期待されているマイクロ波電力伝送の分野において、シンプルな構成で伝送効率を上げるための新しいアレーアンテナ構成法を提案し、実証した。提案手法を用いることで、低コストかつ量産性の高い構成で、SSPSのための大規模な電力分布付きアレーアンテナを設計することが出来る。

SSPSとは宇宙空間で太陽光発電を行い、得られた電力をマイクロ波に変換して無線で地上に伝送し、地上で電力を利用する発電所の構想である。このSSPSにおいては、直径1kmを超える大規模な送電用アレーアンテナを宇宙空間で構築する必要がある。そのため、SSPSの無線電力伝送（WPT）サブシステムには「高い電力伝送効率」と同時に、「大量生産が可能な均一な構造であること」、姿勢変動への対応のために「電氣的なビーム制御が可能であること」が必須となる。

これまでに、高い電力伝送効率を得るための手段の一つとして、送電用アレーアンテナに電力分布を付ける手法が研究されており、その実装方法についても様々な方法が提案されている。それらを大別すると、アレーアンテナの各アンテナ素子から異なる電力を出す手法（手法1）と各アンテナ素子の位置を調整する手法（手法2）である。（手法1）では、複数種類の電力合成回路あるいは複数種類の電力増幅器が必要となるため、高周波回路の効率低下や設計開発コストが増加する欠点がある。（手法2）では、アンテナ素子の間隔を徐々に変化させる、あるいはアンテナ素子を間引いたりする手法があり、アレー構成が複雑になる欠点がある。

これに対して本研究では、単一種類の電力増幅器を用い、アンテナ素子間隔も均一な構成とすることで大量生産を容易にし、さらに電力分布も付けられる方法を提案する。具体的には、アレーアンテナの中心から端部に向けて、サブアレー

一（複数のアンテナ素子を同一の電力分配回路で接続した群（group））を構成するアンテナ素子数を段階的に増加させて、全体の電力密度を所望の電力分布に近似する手法である。各サブアレーへの入力電力を均一とすることで、接続する電力増幅器は単一種類で構成でき、設計開発コストを抑えることが出来る。一方で、アレー全体では電力分布が階段状に付くため、シンプルな構成で電力分布を付けることができ、他の手法と比較しても遜色のない高い電力伝送効率を達成することが出来る。

本研究で提案する構成法は理論上、様々な電力分布に適用し、アレーを設計することが出来る。本論文では提案手法の評価のために、SSPSの検討でよく用いられている10dB端切りガウス分布（以下、ガウス分布）を想定した。

ここで、提案するアレー設計の手順をかんたんに説明する。まず、直径  $D$  の円形アレーアンテナを考え、アレー全体の中心にアレーと同心円の領域  $A$  を設ける。さらに同心ドーナツ状に領域  $B, C, \dots$  を設ける。

領域  $A$  内での1サブアレー構成素子数を  $k \times k$  素子とし、領域  $B, C, \dots$  では、サブアレー構成素子数を  $(k+1)^2, (k+2)^2, \dots, (k+m)^2$  と増加させていく。領域  $A$  のサブアレー構成素子数を各領域のサブアレー構成素子数で除した比  $RE_m = k^2 / (k+m)^2$  を素子数比と定義する。素子数比  $RE_m$  をガウス分布  $RE_m = \exp(-r_m^2 / 2\sigma^2)$ ; 但し  $\sigma = (D/2) / \sqrt{2 \ln(10)}$  の逆関数に代入し、得た値  $r_m$  が各領域の半径方向の中央となるよう各領域の範囲を定める。この構成において、各サブアレーに供給する電力を一定とすることで、各領域から出力される電力密度の比は  $RE_m$  と等しくなり、その結果、全体としてガウス分布に近い電力分布が得られる。

設計したアレーアンテナの特性を、アレーファクタを用いて数値解析した結果、WPTに必要な3項目（「高い電力伝送効率」、「大量生産が可能な均一な構造であること」、「電氣的なビーム制御が可能であること」）を満たしていることを明らかにした。具体的には、分布がない状態よりも5%以上高いメインローブ電力含有率を有し、直径1km以上の大規模アレーアンテナにも有効であり、数度範囲のビーム方向制御も可能であることを明らかにした。さらに考察として、DOE/NASAのReference Systemsに対して提案手法を適用したところ、 $k=3$  が適していることを明らかにした。その際の電力伝送効率は98.5%であり、理想的な分布に対して0.2%の低下で抑えることが可能である。また、その際の第1サイドローブは、従来のガウス分布よりも約  $0.01 \text{ mW/cm}^2$  以上低減できること

を明らかにした。

本研究では理論的解析だけでなく、約 2m の直線状アレーアンテナを設計・製作し実験的に実証した。実証実験の結果、振幅と位相分布の測定結果は理論値とよく一致しており、放射パターン測定結果も理論的予測とよく一致した。さらに実験結果から算出した伝送効率も、事前に設定した許容範囲を満たしていることが確認された。したがって、提案手法を実際のアレーアンテナに適用できることを実証した。

結論として、本研究で提案したアレー構成法は、単一種類の電力増幅器と、均一なアンテナ素子間隔で構成された電力分布付きアレーアンテナを設計することができる。設計されたアレーアンテナは、SSPS の WPT サブシステムに要求される事項を満たしており、大量生産が可能であるため、SSPS の実現に貢献するものである。また、この構成法は設計パラメータとして、アレー中心でのサブアレー構成素子数 ( $k$  値)、電力分布関数、周波数、素子間隔、アレー直径に自由度をもっているため、様々な分野への応用が可能である。