

SPSにおけるフェーズドアレーアンテナの ビーム最適化手法に関する研究

Study on Optimization of Microwave Power Beam of Phased Array Antenna for SPS

石川峻樹¹
Takaki Ishikawa

篠原真毅¹
Naoki Shinohara

京都大学 生存圏研究所¹
Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University

1 まえがき

宇宙太陽発電所 (SPS) とは、静止衛星軌道に巨大な太陽発電衛星を建設し、そこで発電した電力をマイクロ波もしくはレーザー光を用いた無線電力伝送を行うことにより、宇宙で発電した電力を地上で利用するという構想である。SPS においては 36,000km の距離で無線電力伝送を行う必要があるため、そのビーム精度を 0.001° 以下にする必要がある。そのためマイクロ波を用いた SPS においては、フェーズドアレーアンテナを用いた高度なビーム方向制御が必須であると考えられる。フェーズドアレーアンテナとは、複数のアンテナにより構成されるアンテナであり、各素子の位相を制御することにより、その指向性を変化させられるアンテナである。SPS に用いるフェーズドアレーアンテナの制御手法については、現在まで多くの手法が提案されてきたが、それらの手法をまとめた比較・検討は行われていなかった。

そこで本研究ではこれらの制御手法について、シミュレーションや実験を行うことにより、その効果について比較・検討を行うことを目的とした。今回の発表では、本研究において取り扱う制御手法の一つである PAC 法のシミュレーションによる検討について述べる。

2 PAC 法の概要

PAC 法はパネル構造を持つ SPS に対する制御手法として提案された [1]。パネル構造の SPS とは $50\text{cm} \times 50\text{cm}$ 程度の送電一体型のパネルから構成される SPS で、大規模構造物である SPS の打ち上げや建設が簡易となり、また拡張性やメンテナンス性も高いことから、実用的なシステムであるとして検討が進められている [2]。PAC 法は以下のアルゴリズムに従った制御により送電ビームの制御を行う。

1. 各パネルにおいて、地上からのパイロット信号の位相を測定する。
2. 測定したパイロット信号の位相から、パネルの傾きおよびパネルの位置候補を求める。
3. 求められたパネルの傾きおよび位置候補と隣接するパネル同士の位置関係よりパネルの位置を推定を行う。
4. 推定されたパネルの位置から各アンテナにおける送電マイクロ波の位相の補正を行う。

今回は、このアルゴリズムに従った計算により PAC 法に関するシミュレーションを行った。

3 PAC 法シミュレーション

3.1 シミュレーション概要

PAC 法について検討を行うにあたり、PAC 法に関するシミュレーションを行った。今回のシミュレーションではパネルおよびアンテナ素子の配置は、簡単化のために図 1 のような 1 次元の配置としている。送電に用いるマイクロ波およびパイロット信号の周波数はそれぞれ 5.8GHz、2.95GHz とし、パネルの枚数を 200 枚、1 枚のパネルのサイズを 50cm、各パネルには $0.6\lambda (=3.125\text{cm})$ の間隔をあけて 16 個のアンテナ素子が並んでおり、パイロット信号の測定はパネルの両端で行うものとした。また各パネルの傾きは $\pm 3^\circ$ の幅でランダムに設定するものとしている。このとき、放射されるマイクロ波に関して、遠方界での各アンテナによる電界の重ね合わせを計算して放射パターンを導出することにより、PAC 法による制御の効果について検討を行った。

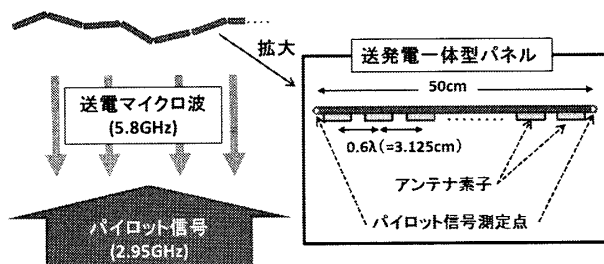


図 1 シミュレーションにおけるパネルの設定

3.2 PAC 法による制御の効果についての検討

パネルがランダムに設定した傾きを持った状態で、放射されるマイクロ波の位相の補正を行わない場合、図 2 の左図のような放射パターンであるのに対し、PAC 法による制御を行った場合の放射パターンは図 2 の右図のようになった。図 2 はパイロット信号の到来方向を 0° として -0.5° から 0.5° までの放射パターンを求めたものである。また放射電力強度は、すべてのアンテナ素子から放射されたマイクロ波の位相がそろっている場合の放射パターンのピーク値が 1 となるように規格化している。この結果より、PAC 法による制御を行うことで、マイクロ波のビームの方向制御が可能であることが確認できる。またこのとき行ったシミュレーションでは、各パネル同士の間はしっかりと接続されているものとしてい

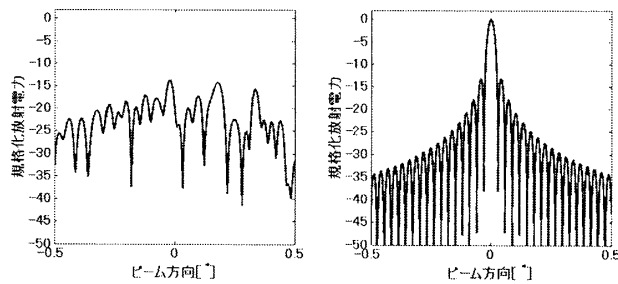


図2 制御前(左)と制御後(右)の送電マイクロ波の放射パターン

る。一方で、実際のSPSについて考えた場合、パネル同士がしっかりと接続されておらず、ある程度の間隔が開く部分が存在することも考えられる。そこでパネル同士がしっかりと接続されていない場合についても検討を行った。PAC法ではパネルの位置推定を行う際に、図3のように、測定された位相から求められた複数のパネル位置の候補の中から、隣接するパネルの位置に最も近いものが実際のパネルの位置であるとして、パネル位置推定を行っている。よってパネル位置推定が正確に行えるためには、パネル接続部の間隔がパイロット信号の半波長以下となっている必要がある。パネル位置推定で誤

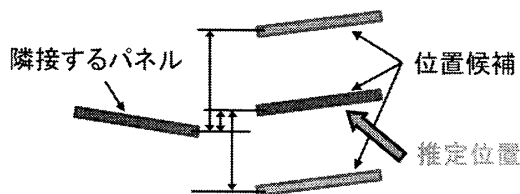


図3 パネル位置の推定法

りが起きた場合の、各アンテナ素子から放射されるマイクロ波の位相に発生する誤差について計算を行ったところ、パイロット信号の周波数が2.95GHz、送電に用いるマイクロ波の周波数が5.8GHzのとき、パネル位置推定が一段階ずれると約12.5°の誤差が生じることが分かった。またパネル位置推定の誤りは、以降のパネル位置推定にも影響を与えることとなるため、一度誤りが発生するとそれ以降のパネルから放射されるマイクロ波は一定の位相誤差を持って放射されることとなる。この位相誤差はランダムに発生する誤差などとは異なり、一定の偏りを持つこととなるため、誤差の発生の仕方によっては放射電力強度のピークの低下だけではなく、マイクロ波のビームの向きに対しても影響を与えることがわかっていて、そのためPAC法ではパネル位置推定の誤りが起きないように、対策を行う必要がある。

3.3 パイロット信号位相測定誤差の影響

次にパイロット信号の位相測定における誤差の影響について、シミュレーションにより検討を行った。今、各パイロット信号の位相測定において、正規分布に従った誤差を与え、そのときの放射電力強度のピークの値につ

いて調べた。結果は図4となった。横軸は与えた誤差の標準偏差の値、縦軸は誤差がない場合を100%としたときの電力強度の値をとっている。また各点の値は100回計算を行った時の平均を取ったものである。この結果からパイロット信号の位相測定誤差の標準偏差が8°程度であれば電力強度は誤差が存在しない場合の95%となり、電力強度の低下は小さく抑えられることがわかる。また図5はパイロット信号の位相測定誤差の標準偏差が8°のときの各アンテナ素子から放射されるマイクロ波の位相誤差の分布を表したものである。マイクロ波の位相誤差は標準偏差が12.8°程度の正規分布に従った誤差が現れている。同様の計算をパイロット信号の位相測定誤差の標準偏差を変えて行ったところ、パイロット信号の位相測定誤差と各アンテナ素子から放射されるマイクロ波の位相誤差の標準偏差の値には比例関係がみられた。そのため、マイクロ波の位相誤差の許容範囲を決めることで、パイロット信号の位相測定誤差の許容範囲を求めることが可能であることが分かった。

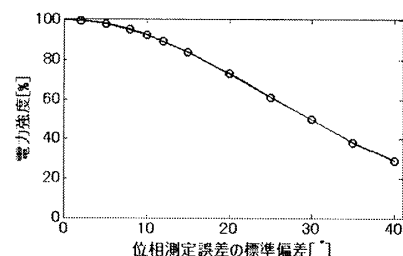


図4 位相測定誤差と送電マイクロ波の電力強度

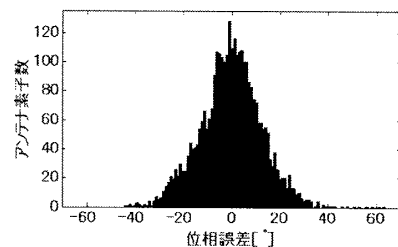


図5 アンテナ素子から放射されるマイクロ波の位相誤差分布

4 むすび

シミュレーションにより、PAC法の効果およびパイロット信号の位相測定に誤差が生じた場合の影響について検討を行った。また今後は実験を行うことで、より詳細な検討を進めていく予定である。

参考文献

- [1] 安間健一, 成田貴則, 福田信彦, マイクロ波無線送電技術委員会, “宇宙太陽発電システム 送電制御技術(PAC法、並列化法)の開発”, 第54回宇宙科学技術連合講演会講演集, IS13, 2010.11
- [2] (財) 無人宇宙実験システム研究開発機構, “平成19年度太陽光発電利用促進技術調査成果報告書”, 2008.3