

## パネル構造をもつ SPS のためのパネル位置推定を用いた 位相補正技術の制御精度に関する研究<sup>†</sup>

### Study on Control Accuracy of Phase Correction Method with Panel Position Estimation for Panel-structure SPS

石川 峻 樹<sup>\*1‡</sup>・篠原 真 毅<sup>\*1</sup>  
Takaki ISHIKAWA and Naoki SHINOHARA

テザーSPSのように、多数のパネルを接続することにより構成されたSPSは、パネル接続部が可動であることから、送電アンテナのアンテナ面の形状を維持することが困難である。SPSにおけるマイクロ波電力伝送の実現のためには、アンテナ面のゆがみによる影響を補正するビーム制御を行う必要がある。本研究では、パネル構造を持つSPSのシステムを対象として提案されたPAC法と呼ばれる手法の位相補正の制御精度の評価について述べる。

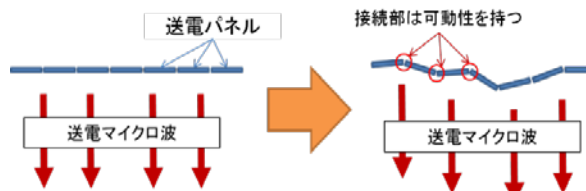
A tethered SPS consists of power generation and transmission panel modules. These panel modules are connected flexibly and the antenna surface of the panel-structured SPS is easily deformed. When the antenna surface is deformed, the beam shape of a phased array antenna on the panel-structured SPS is deformed. Thus, we must correct the output phases of the phased array antenna on the panel modules to maintain high transmission efficiency in the panel-structured SPS. In this study, we consider a phase correction method which is called a Position and Angle Correction (PAC) method and evaluate the phase correction accuracy of this method.

**Keywords** : Solar Power Satellite, Microwave power transmission, Phased array antenna

#### 1. はじめに

PSとは、静止衛星軌道に建造した太陽発電衛星において得られた電力を無線電力伝送技術により、地上へ送電を行い利用する構想である<sup>1)</sup>。現在、マイクロ波無線電力伝送を用いたSPSのモデルの一つに、テザー型SPS<sup>2)</sup>と呼ばれるモデルがある。このモデルは、一辺が50cm程度の発電の機能をもったパネルを最小の単位とし、同様のパネルを多数並べることで、一辺数kmの大型のSPSを構成するパネル構造を持ったSPSである。送電にはフェーズドアレーアンテナと呼ばれる、多数のアンテナ素子から構成されるアンテナを用いており、各素子から放射されるマイクロ波の位相・振幅を制御することで、ビームの形成を行うことが可能なアンテナが用いられる。フェーズドアレーアンテナの送電ビーム方向制御においては、各アンテナ素子における位相制御が重要となる。一方で、パネル構造型SPSは各パネルの接続部が可動性を持っていることから、SPS全体としてのアンテナ面の形状を固定することが困難であ

り、パネル位置の変化による送電マイクロ波の位相のずれが発生し、位相制御に誤差が生じることとなる。第1図に、アンテナ面の形状のゆがみによる影響のイメージを示す。図に示したように、アンテナ面にゆがみが生じ、送電マイクロ波の位相制御にずれが発生する。そのため、パネル構造をもつSPSにおいて、高度な送電マイクロ波ビームの制御を実現するためには、パネル位置変化による位相の変化の補正を行う必要がある。



第1図 アンテナ面のゆがみによる影響のイメージ

#### 2. 位相補正手法について

本研究で検討を行うのはPAC法<sup>3)</sup>と呼ばれる手法である。PAC法は、まず地上の受信位置より発信されたパイロット信号について、各パネル上でパイロット信号の到達位相の測定を行う。得られた到達位相から、パイロット信号の到

<sup>†</sup> 第1回宇宙太陽発電シンポジウム, 2015年12月15-16日, 東京にて発表

<sup>‡</sup> Corresponding author: Takaki ISHIKAWA.

E-mail: i-takaki@rish.kyoto-u.ac.jp

\*1 生存圏研究所研究所

〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄,

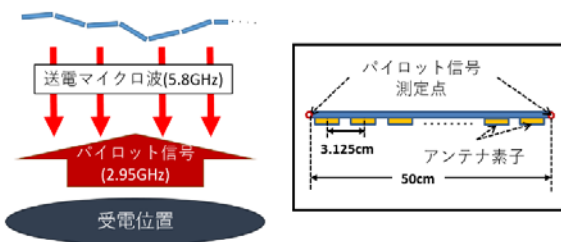
Research Institute for Sustainable Humanosphere (RISH), Kyoto University, Gokasho, Uji, Kyoto, 611-0011, Japan

来方向推定からパネルの傾きを求め、パネルの角度と到達位相からパネルの位置を求める。ただし、パネル位置は到達位相の値から求めることから、等波面ごとに複数の候補が求まる。このとき、隣接パネルとの相対的な位置関係から、実際のパネル位置の特定を行う。同様のパネル位置推定をすべてのパネルにおいて行うことで SPS 全体のパネル位置を推定し、送電マイクロ波の位相のずれを補正することにより送電ビームの形成を行う。

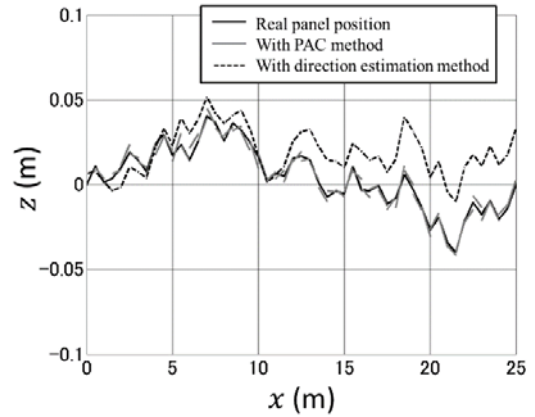
### 3. 直線アレーの SPS 簡易モデルにおける検討

PAC 法について、第 2 図に示した直線アレーの SPS 簡易モデルで検討を行った。第 2 図に示すように、パネルの長さを 50 cm、送電マイクロ波の周波数を 5.8 GHz、パイロット信号の周波数を 2.95GHz、各パネル上に 16 素子の送電アンテナ素子が等間隔に配置されているものとしている。このようなモデルにおいて、パネルの枚数を 50 枚とした場合の PAC 法によるパネル位置推定およびビーム形成の結果を第 3 図および第 4 図に示す。これらの検討では、比較のため、パネル角度推定のみを利用した手法についても検討を行っている。この手法はパネル同士がつながっていることを前提として、パネル角度推定の結果から SPS 全体のパネル位置推定を行う手法となっている。第 3 図の縦軸はパイロット信号の進行方向に平行な向きにおける位置、横軸はパイロット信号の進行方向に垂直な向きにおける位置を表している。黒の実線は SPS 簡易モデルの実際の位置、灰色の実線は PAC 法によって推定された位置、黒の破線は角度推定のみによって推定された位置となっている。結果として、パネル角度推定のみを用いた場合には、パネル位置推定における誤差が別のパネル位置推定に伝搬することにより推定に大きな誤差が発生しているが、PAC 法を用いた場合には、誤差の伝搬による影響は見られず、全体的にパネル位置推定における誤差が小さくなっている様子が確認できる。第 4 図はアンテナパターンのシミュレーション結果を示している。第 4 図の縦軸は電力強度を、横軸は角度を表している。図より、補正を行わなかった場合やパネル角度推定のみを用いた場合には、ターゲットの方向にビームを向けることができなかったが、PAC 法を用いた場合には高い精度でビームの制御が行えていることが確認できた。このことから、パイロット信号の位相測定において誤差が生じる場合でも、PAC 法を用いることにより、位相の補正を行うことができることが確認できる。

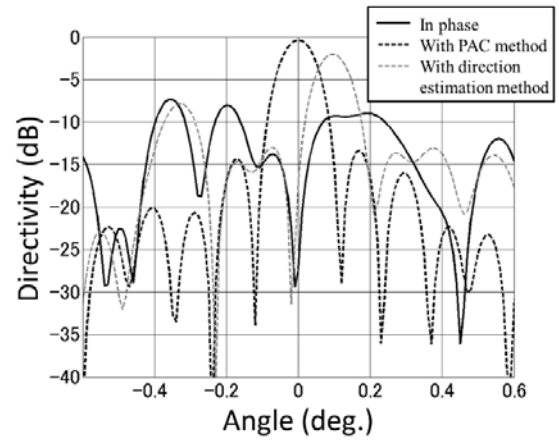
次に、直線アレーモデルにおける位相制御精度の検討について述べる。制御精度の検討には第 4 図に示す誤差評価モデルを用いる。図のようにパイロット信号の測定点 A と測定点 B の位置をそれぞれ  $l_A$ ,  $l_B$  とする。また、パイロット信号の周波数を  $f_s$ 、送電マイクロ波の周波数を  $f_t$ 、各測定



第 2 図 SPS 簡易モデルのイメージ図



第 3 図 PAC 法によるパネル位置推定の結果



第 4 図 PAC 法によるビーム形成の結果

点における位相測定の誤差をそれぞれ  $\delta_A$ ,  $\delta_B$  とする。このとき、 $l_t$  の位置に設置された送電アンテナ素子における、送電マイクロ波の位相制御誤差  $\delta_t$  は式(1)で表すことができる。

$$\delta_t = \left( (\delta_B - \delta_A) \frac{l_t}{l_B - l_A} + \frac{\delta_A + \delta_B}{2} \right) \frac{f_t}{f_s} \quad (1)$$

式(1)の右辺の第一項は PAC 法の角度推定における誤差を表しており、第二項は PAC 法の一推定における誤差を表している。式(1)より角度推定誤差はパイロット信号の測定点の位置および送電アンテナの位置により決まることがわかる。一方で、位置推定誤差は測定点の位置には影響されないことがわかる。この結果より、PAC 法における誤差を小さくするためには、測定点間の長さを大きくする必要があることがわかる。また、パイロット信号の位相測定の誤差を標準偏差が  $\sigma$  の正規分布にしたがって発生すると仮定すると、 $l_t$  の位置に設置された送電アンテナ素子における、送電マイクロ波の位相制御誤差の標準偏差  $\sigma_t$  は式(2)で表すことができる。

$$\sigma_t = \left( \left( \sqrt{2} \sigma \left| \frac{l_t}{l_B - l_A} \right| \right)^2 + \left( \frac{\sigma}{\sqrt{2}} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \times \frac{f_t}{f_s} \quad (2)$$

式(2)からも、誤差の大きさを小さくするためには、パイロット信号の測定点の間隔を広くする必要があることがわか

る。また、2つの測定点をパネルの両端に配置し、位相測定誤差の標準偏差  $\sigma$  を  $10^\circ$  とすると、簡易モデルのパネル上のすべてのアンテナ素子の誤差の標準偏差は約  $16^\circ$  となる。

#### 4. 平面アレーの SPS モデルにおける検討

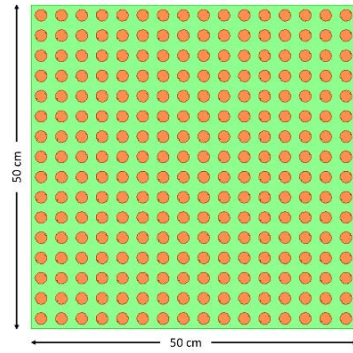
PAC 法について、第5図に示した平面アレーモデルにおける制御精度の検討について述べる。第5図に示すように、パネルの一边の長さは 50 cm で、各パネル上に 256 素子の送電アンテナ素子が等間隔に配置されているものとしている。また、平面アレーモデルにおける測定点の配置としては、第6図および第7図に示した2通りの配置法が考えられる。第6図は3点の測定点を三角形の形に配置したモデル、第7図は4点の測定点を四角形の形に配置したモデルとなっている。各配置での PAC 法の制御精度の評価を行い、PAC 法における最適な配置の検討を行う。

まず、測定点が3点の場合のモデルについて述べる。第6図に示したように、3点の測定点を  $A_1, A_2, A_3$  とし、それぞれの座標を  $(l_{x,1}, l_{y,1}), (l_{x,2}, l_{y,1}), (l_{x,1}, l_{y,2})$  とする。また、パイロット信号の周波数を  $f_s$ 、送電マイクロ波の周波数を  $f_t$  とし、各測定点におけるパイロット信号の位相測定の誤差の標準偏差が  $\sigma$  の正規分布にしたがって発生すると仮定する。このとき  $(l_x, l_y)$  の位置に設置された送電アンテナ素子における、送電マイクロ波の位相制御誤差の標準偏差  $\sigma_t$  は式(3)で表すことができる。

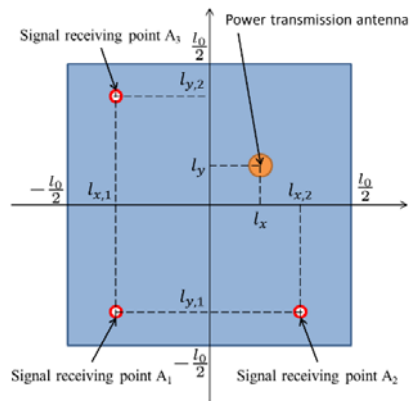
$$\sigma_t = \frac{1}{3} \frac{f_t}{f_s} \left\{ 3 + 2 \left( \frac{3l_x - 2l_{x,1} - l_{x,2}}{l_{x,2} - l_{x,1}} \right)^2 + 2 \left( \frac{3l_y - 2l_{y,1} - l_{y,2}}{l_{y,2} - l_{y,1}} \right)^2 + \frac{3l_x - 2l_{x,1} - l_{x,2}}{l_{x,2} - l_{x,1}} \times \frac{3l_y - 2l_{y,1} - l_{y,2}}{l_{y,2} - l_{y,1}} \right\}^{\frac{1}{2}} \sigma. \quad (3)$$

式(3)から、誤差の大きさを小さくするためには、簡易モデルの場合と同様に、測定点間の長さを広くすることがわかる。また、式(3)より、第5図に示した平面アレーモデルの各送電アンテナ素子における位相制御誤差の標準偏差を求めると第7図となる。ただし、精度が最も高くなる場合について考慮するために、測定点  $A_1, A_2, A_3$  の3点がそれぞれパネルの頂点の位置に配置されているものとし、パイロット信号の位相測定の誤差の標準偏差  $\sigma$  を  $10^\circ$  として場合について計算を行っている。第7図の結果から、3点の測定点の重心に相当する位置において誤差の標準偏差が約  $11.4^\circ$  で最小となり、重心位置から最も離れた部分において誤差の標準偏差が約  $32.6^\circ$  で最大となることがわかる。また、全体の誤差の標準偏差は約  $18^\circ$  となる。測定点が配置されていないパネルの角の付近において、誤差が非常に大きくなっており、制御精度の観点から問題があると考えられる。

次に、測定点が4点の場合のモデルについて述べる。第7図に示したように、4点の測定点を  $A_1, A_2, A_3, A_4$  とし、それぞれの座標を  $(l_{x,1}, l_{y,1}), (l_{x,2}, l_{y,1}), (l_{x,1}, l_{y,2}), (l_{x,2}, l_{y,2})$  とする。また、パイロット信号の周波数  $f_s$ 、送電マイクロ波の



第5図 平面アレーモデル



第6図 PAC 法によるビーム形成の結果

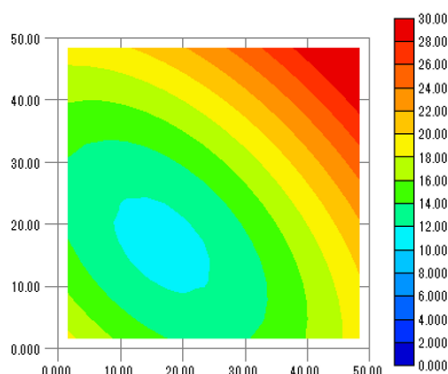
周波数を  $f_t$  とし、各測定点におけるパイロット信号の位相測定の誤差の標準偏差が  $\sigma$  の正規分布にしたがって発生すると仮定する。このとき  $(l_x, l_y)$  の位置に設置された送電アンテナ素子における、送電マイクロ波の位相制御誤差の標準偏差  $\sigma_t$  は式(4)で表すことができる。

$$\sigma_t = \frac{1}{2} \frac{f_t}{f_s} \left\{ 1 + \left( \frac{2l_x - l_{x,1} - l_{x,2}}{l_{x,2} - l_{x,1}} \right)^2 + \left( \frac{2l_y - l_{y,1} - l_{y,2}}{l_{y,2} - l_{y,1}} \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \sigma. \quad (4)$$

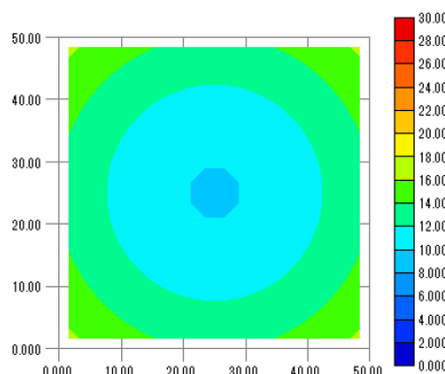
式(4)から、誤差の大きさを小さくするためには、測定点が3点の場合と同様に、測定点間の長さを広くすることがわかる。また、式(4)より、第5図に示した平面アレーモデルの各送電アンテナ素子における位相制御誤差の標準偏差を求めると第8図となる。ただし、精度が最も高くなる場合について考慮するために、測定点  $A_1, A_2, A_3, A_4$  の4点がそれぞれパネルの頂点の位置に配置されているものとし、パイロット信号の位相測定の誤差の標準偏差  $\sigma$  を  $10^\circ$  として場合について計算を行っている。第8図の結果から、3点の場合と同様に、4点の測定点の重心に相当する位置において誤差の標準偏差が約  $9.9^\circ$  で最小となり、重心位置から最も離れた部分において誤差の標準偏差が約  $16.3^\circ$  で最大となることがわかる。また、全体の誤差の標準偏差は約  $13^\circ$  となる。測定点が3点の場合と比較して、位

相制御誤差の大きさが小さくなっていることが確認できる. このことから, 実際の SPS と同様の平面アレーモデルにおいて, PAC 法による制御を行う場合には, 測定点が少なく

いても, PAC法による制御精度の評価を行った. この評価では, パイロット信号の測定点の配置について, 3点の測定点を三角形の頂点に配置する方法と, 4点の測定点を四角形



第7図 PAC法によるビーム形成の結果



第8図 PAC法によるビーム形成の結果

とも4点必要であることがわかる.

## 5. まとめ

本研究では, パネル構造型SPSにおける, アンテナ面のゆがみによる, 送電マイクロ波のビーム形状の変化を補正する手法について検討を行った. 本研究で検討を行ったのは, PAC法と呼ばれる手法である. PAC法はパイロット信号を利用して, パネル位置の推定を行うことで, アンテナ形状のゆがみによって発生した位相のずれを補正する手法である. 直線アレーの簡易モデルにおいて, PAC法による補正の精度の評価を行ったところ, パイロット信号の位相測定点の間隔を広くすることにより精度がよくなる傾向があることが確かめられた. これは, 測定点間の長さが長くなることにより, パネル角度推定の精度が高くなるためである. そのため, PAC法による補正を行う際には, パイロット信号の測定点間の長さを長くする必要があることがわかった. また, 実際のSPSと同様の平面アレーモデルにお

の頂点に配置する方法の, 2通りの並べ方を検討した. 結果として, いずれの場合についても, 測定点の重心位置からの距離が遠くなるほど誤差が大きくなる傾向があった. そのため, 測定点が3点の場合には, 測定点を配置しなかった角の付近での誤差が大きくなることから, PAC法によって高い精度で補正を行うためには, 測定点が4点必要であることがわかった.

## 参考文献

- 1) Glaser, P. E.: Power from the Sun: Its Future, *Science* (1968), pp. 857-861.
- 2) Sasaki, S., Tanaka, K., Higuchi, K., Okuizumi, N., Kawasaki, S., Shinohara, N., Senda, K. and Ishimura, K.: A New Concept of Solar Power Satellite: Tethered-SPS, *Acta Astronautica* **60** (2006), pp.153-160.
- 3) 安間健一, 成田貴則, 福田信彦: マイクロ波無線送受電技術委員会, 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集 IS13 (2010).

(2015.12.25 受付)