

パネル構造型SPSにおけるビーム補正のための 送電パネル位置推定に関する研究

Study on Position Estimation of Transmission Panels
for Microwave Power Beam Correction for Panel-Structure SPS

石川峻樹
Takaki Ishikawa

篠原真毅
Naoki Shinohara

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

1 まえがき

宇宙太陽発電所 (Space Solar Power Satellite/Station: 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電力伝送により地上へと送電し、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 の距離をマイクロ波電力伝送を行う必要があるため、送電マイクロ波のビーム方向を 0.001 度以下の精度で制御する必要がある。そのため、送電用のアンテナとしては、アンテナ素子の位相の制御によりビームパターンを電氣的に制御可能なフェーズドアレーを用いるものとされている。現在、日本では SPS のモデルとしてパネル構造型 SPS が提案され、実用化を目指し研究が進められている [1]。パネル構造型 SPS は 50cm 四方のサイズの送電一体型のパネルを最小のユニットとし、それらのパネルを多数並べることで一辺が数 km のサイズの SPS を構成するモデルである。

一般に宇宙空間では、大型構造物は固有の振動を持ち、構造物の平面性を維持することは困難であり、パネル構造型 SPS においても、各パネルを平行に並べることが困難である。これにより、送電アンテナ面に歪みが生じることとなり、高精度なビーム制御を実現するためには、アンテナ面の歪みによる影響を補正することが重要となっている。本研究では、このようなパネル構造型 SPS におけるアンテナ面の歪みによるアンテナ素子の位相の変化を補正する手法について検討することを目的としている。ただし今回行っている検討では、SPS およびパネル配置を図 1 のような直線状のアレーとして検討を行っている。

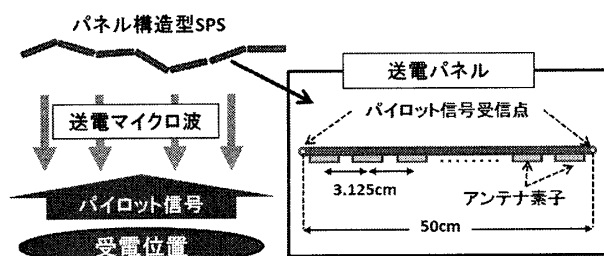


図 1 シミュレーションにおけるパネルの設定

2 PAC (Position and Angle Correction) 法

PAC 法とは、パネル構造型 SPS におけるアンテナ面の歪みによる位相の変化を補正する手法として提案されたビーム補正の手法である [2]。PAC 法による制御の手順は、以下のように表せる。

1. 各パネルにおいて、地上の受電位置より発信されたパイロット信号の到達位相を測定する。
2. パネル上の 2 点で測定したパイロット信号の位相差から、到来方向推定を行い、各パネルの角度を求める。
3. 求められたパネルの角度・到達位相から推定されるパネルの位置候補と隣接するパネル同士の位置関係を用いてパネルの位置推定を行う。
4. 推定されたパネルの位置から各アンテナ素子における位相の補正を行う。

PAC 法による位相補正の精度は、各パネル上のパイロット信号受信点の位置と位相測定の精度によって決まることが分かっており、精度を高くするためには、位相測定点を少なくともパネルの両端に配置する必要がある。そのため、パイロット信号測定点がパネルあたりに 2 点の場合は、パネルの両端にのみ配置することとなる。実際のシステムを考慮し、送電マイクロ波の周波数を 5.8GHz、パイロット信号の周波数を 2.95GHz とすると、PAC 法の手順 2. で推定可能なパネル角度の大きさの最大は約 5 度となり、角度の大きさが 5 度を超えるものが 1 か所でも存在すれば、到来方向推定にアンビギュエティが発生し、PAC 法による補正が行えなくなってしまう。そこで今回は、位相測定点の数を増やした場合について検討を行い、パネル角度推定のために行う到来方向推定において、アンビギュエティによる推定の誤りが発生しないための条件について検討した。ただし、パネル角度の大きさの最大を 45 度、パイロット信号の位相測定の誤差を最大で 15 度として到来方向推定に関するシミュレーションを行い評価することとした。

3 到来方向推定シミュレーション

信号の到来方向推定では、まず 2 点で受信した信号の位相差から信号の経路差 l を求め、次に 2 点間の距離 d と経路差の長さを用いて、 $\theta = \sin^{-1}(l/d)$ として、到来方向 θ を求める。このとき、位相差は -180 度から 180 度の範囲でしか求められないため、2 つの測定点間の長さが信号の半波長よりも大きい場合には、推定される経路

差が $l_k = l \pm k\lambda$ のように複数求まり、これが推定の結果にアンビギュイティが生じる原因となっている。ただし、 k は整数、 λ は信号の波長である。測定点が3点以上の場合の到来方向推定の方法は、まず測定点を2点選んだ場合にできるすべての組み合わせについて、2点の場合と同様の到来方向推定を行い、アンビギュイティを含めた全ての候補を求める。その後、全ての推定の中から到来方向の候補を1つつ選んだ際の推定値の分散を計算する。同様の計算をすべての候補の組み合わせについて行い、分散の値が最も小さくなったものが実際の到来方向であるとする。今回のシミュレーションでは測定点が3点と4点の場合について計算を行い、正しくアンビギュイティが除去できる確率を求めるものとした。また各場合の測定点の配置は図2のように設定するものとし、いずれの場合も測定点1, 2はパネルの両端に固定し、測定点3, 4の位置を変化させ、そのときのアンビギュイティの除去成功率の計算を行った。ただし、計算を行う際には、位相測定の誤差を考慮し、理想的な到達位相の値に誤差として -15 度から 15 度までの値をランダムに印加するものとしている。

シミュレーションによる結果は図3, 図4となった。各グラフは横軸に実際のパイロット信号到来方向、縦軸に測定点が3点の場合は測定点3, 測定点4点の場合は測定点4の位置を表しており、カラーマップはアンビギュイティの除去成功率を表している。ただし、測定点が4点の場合のものは測定点3の位置を測定点1から5cmとした場合の結果である。図3の結果から、まず3点のシステムは誤差によってアンビギュイティの除去を失敗しやすいことが確認出来る。一方で、誤差がある程度大きい状況でも、3点目の位置を0.1mの位置に取った場合などでは、パネル角度が -30 度から 30 度の範囲であればアンビギュイティの除去が可能であることが分かった。図4の結果から、測定点が4点の場合は、測定点3を端から5cm, 測定点4を端から20cm程度の位置に配置することで、位相測定の誤差がある程度大きい状況でも、パネル角度が -60 度から 60 度の範囲まで、アンビギュイティの除去が行えていることが確認出来る。以上の結果から、位相測定の誤差およびパネルの取りうる角度が、今回の設定よりも十分に小さな値を取る範囲内に確実に抑えられる場合には、測定点の数は3点でも大丈夫であるが、測定の誤差やパネル角度の値が今回の設定に近い値を取る可能性が存在する場合には、測定点を4点用意する必要があることが分かる。

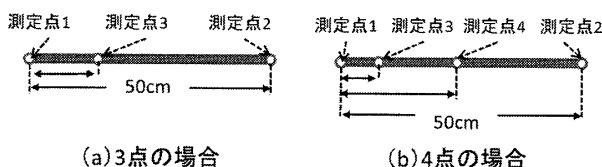


図2 測定点の配置

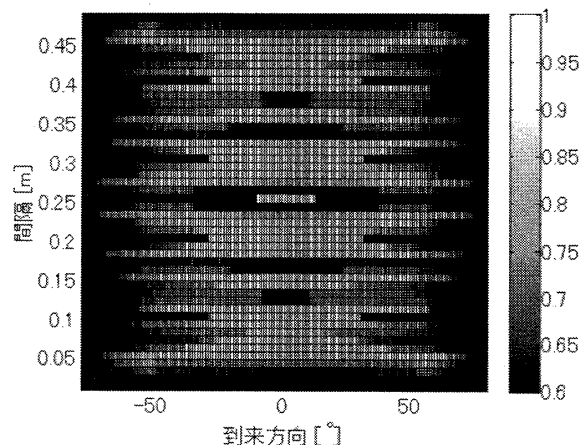


図3 測定点が3点の場合のアンビギュイティ除去成功率

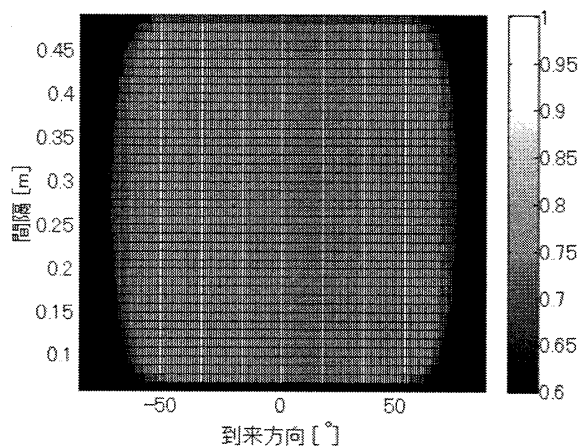


図4 測定点が4点の場合のアンビギュイティ除去成功率 (測定点3の位置: 5cm)

4 まとめと今後の予定

今回の結果から、PAC法における到来方向推定について、誤差がある程度大きい場合についても、アンビギュイティによる推定の誤りを発生させないためには、パイロット信号の受信点が4点あれば良いことが分かった。今後は実験により今回のシミュレーションの結果を確認するとともに、直線アレーの結果をもとに平面アレーのシステムを検討し、送電に対する効果まで含め検討を行っていく必要がある。特に測定点の増加は、パネル上に配置することができる送電用のアンテナの数にも影響を与えるため、送電アンテナの数の減少なども考慮し、最終的な電力伝送への影響なども含めて検討を行っていく。

参考文献

- [1] (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
- [2] 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, 1S13, 2010.11