

パネル構造型宇宙太陽発電所のための パネル位置推定を用いたビーム形成技術の研究

石川 峻樹[†] 篠原 真毅[†]

[†] 京都大学生存圏研究所 〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄

E-mail: [†] {i-takaki, shino}@rish.kyoto-u.ac.jp

あらまし 宇宙太陽光発電所(SPS)を実現するためには、高精度な送電マイクロ波のビーム制御を行う必要がある。宇宙で大型の構造物の平面性を維持するのは困難であるため、SPSの送電アンテナはアンテナ面に歪みを生じる。本研究では、送電アンテナのアンテナ面の歪みによる、フェーズドアレーアンテナにおける放射位相の変化を補正する手法であるPAC (Position and Angle Correction) 法と呼ばれる手法について検討を行っている。本発表では、PAC法による補正の精度や実際の宇宙太陽光発電所において用いるための測定点の配置について述べる。

キーワード 宇宙太陽光発電所, 到来方向推定, 位相誤差

Study on Microwave Power Beam Forming Methods with Panel Position Estimation for Panel-Structure Solar Power Satellite/Station

Takaki ISHIKAWA[†] and Naoki SHINOHARA[†]

[†] Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University Gokasho, Uji-shi, Kyoto, 611-0011 Japan

E-mail: [†] {i-takaki, shino}@rish.kyoto-u.ac.jp

Abstract We have to achieve high beam direction control accuracy, in order to realize a solar power satellite/station (SPS). It is difficult to maintain flatness of huge structure in space and the power transmission antenna surface of SPS is not flat. In this study we simulate one of the beam correction methods of phased array antenna for the SPS which is called a PAC (Position and Angle Correction) method. The PAC method corrects output phase errors of power transmission microwaves cause by positional change of antenna elements. In this paper, we describe the phase correction accuracy and positions of pilot signal phase measurement points in order to use the PAC method for a real SPS system.

Keyword Solar power station/satellite, Direction of arrival estimation, Phase error.

1. 研究背景

宇宙太陽発電所(Solar Power Satellite / Station: SPS)とは、静止衛星軌道に非常に大型の太陽発電衛星を建設し、発電した電力をマイクロ波無線電力伝送技術あるいはその他の無線電力伝送技術を用いることで、宇宙において発電した電力を地上で利用するという構想である。現在、日本ではテザーSPSと呼ばれるタイプのSPSモデルが提案されている[1]。図1はテザーSPSのイメージ図となっており、平面状のパネル構造型SPSを、テザーで吊ることによりSPSの姿勢の安定化を行うシステムとなっている。また、パネル構造型SPSの構成は図2のように表せる。パネル構造型SPSは一辺の長さが50cm程度のパネルを最小のユニットとし、これらのパネルを多数並べることで、一辺の長さが2.5kmにもなるSPSを構成するモデルである。各パネルは片方の面に太陽電池パネルを、反対側の面に送電用のフェーズドアレーアンテナを持ち、2つの面の間

にマイクロ波発振器などの内部機器を配置するという、サンドイッチ構造を持った送電一体型のパネルとなっている。また地上での出力を1GW、無線電力伝送には5.8GHzのマイクロ波を用いるものとし、各パネルには256個のアンテナ素子が配置され送電を行うモデルとなっている。パネル構造型のSPSは量産性に優れるといった利点があるが、一方で、パネルの接続部が可動であることから、SPS全体のアンテナ面には歪みが発生することとなる。SPS実現のためには、アンテナ面の歪みによって発生する、送電マイクロ波の出力位相のずれを補正することが重要となる。本研究では、アンテナ面の歪みによる送電マイクロ波の位相のずれを補正する手法の一つであるPAC (Position and Angle Correction) 法について検討を行い、パネル構造型SPSにおけるビーム形成技術の確立を目指す。

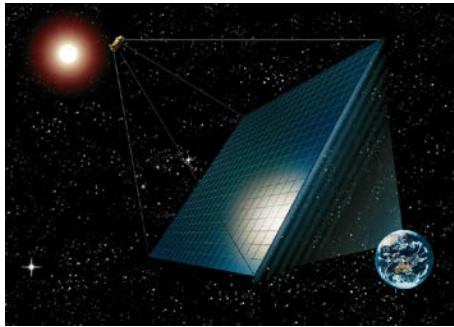


図 1 テザー-SPS のイメージ図

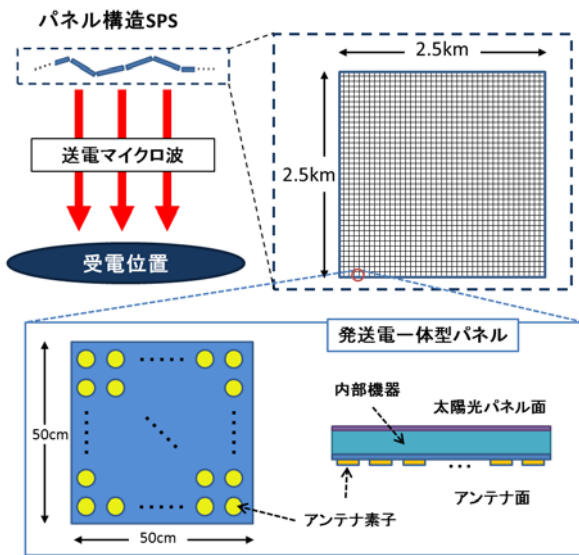


図 2 パネル構造型 SPS の構成

2. PAC 法

PAC 法は地上に設置された送電マイクロ波の受電位置より発信されるパイロット信号を利用し、パネルの位置を求め、その位置情報より送電マイクロ波の出力位相を補正する手法である[2]。パイロット信号の周波数は、実際の SPS での運用を検討し、2.95GHz とした。先行研究では、図 3 のような 1D 配置の SPS モデルにおいて、測定点の配置とパイロット信号位相測定誤差と送電マイクロ波位相補正誤差の関係について検討を行った[3]。検討の結果、位相補正誤差は測定点の配置と位相測定誤差によって決まることが分かった。また、位相補正誤差を可能な限り小さくするためには、位相測定点をパネルの両端に配置する必要があることが分かった。しかし、測定点が 2 点の場合に、測定点をパネルの両端に配置すると、PAC 法のパネル位置推定の過程で行う、パネル角度推定のためのパイロット信号到来方向推定においてアンビギュイティが生じ、パネル角度の候補が複数定まることとなり、PAC 法による

ビームの制御が不可能になることが分かった。そこで PAC 法におけるパイロット信号到来方向における、アンビギュイティの除去法について検討を行うこととした。

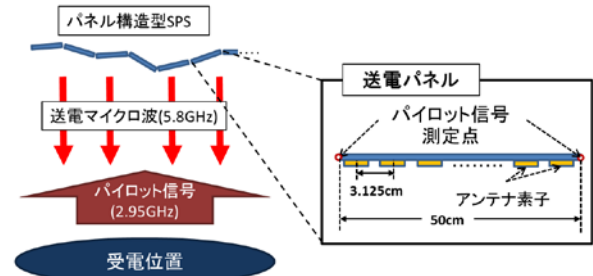


図 3 1D 配置の SPS モデル

3. 到来方向推定におけるアンビギュイティ

3.1. アンビギュイティの除去法について

到来方向推定におけるアンビギュイティの除去法として、位相測定点の数を増やすことを検討する。また、実際の SPS のコストや送電アンテナの配置への影響などを考えると、位相測定点の数は少ない方が好ましいと考えられるため、可能な限り少ない測定点の数によるアンビギュイティ除去を目指した。またアンビギュイティ除去の目標を、位相測定誤差の大きさの最大値を 15 度と設定した場合に、パネルの角度が -45 度から 45 度の範囲で確実にアンビギュイティ除去が行えることとした。

3.2. 位相測定点が 3 点の場合

より少ない位相測定点で到来方向推定のアンビギュイティの除去を目指し、パネル上の位相測定点の数を 3 点とした場合について検討を行うこととした。位相測定点の配置は図 4 のように、パネルの両端に測定点 A、測定点 B を配置し、測定点 C をパネル上の任意の点に配置するものとした。

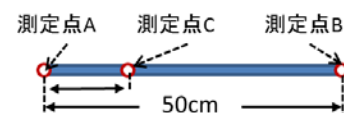


図 4 位相測定点が 3 点の場合のモデル

また、この時の到来方向推定の手順を以下に示す。

- 1) 3 つの測定点から 2 つの測定点を選んだ場合のすべての組み合わせに関して、アンビギュイティを含めたすべての到来方向の候補を求める。
- 2) 求めた到来方向の候補のすべての組み合わせについて、平均からの分散を計算する。

3) 各組合せの中で、平均からの分散が最も小さくなるような到来方向を、真の到来方向とする。

以上の手順に従い、位相測定点が3点の場合の到来方向推定におけるアンビギュイティの除去成功率をシミュレーションにより計算した。シミュレーションは、測定点Cの位置とパネルの角度を変化させ、各条件において、位相測定誤差が0度の場合と-15度から15度までの範囲でランダムに設定した場合について、到来方向推定のアンビギュイティの除去成功率を計算している。除去成功率は、各条件について誤差の値をランダムに変化させて500回到来方向推定の計算を行うことで求め、また推定によって得られた到来方向から来た信号の経路差の長さを実際の到来方向から来た信号の経路差の長さの差が信号の半波長よりも短くなった場合に、正しくアンビギュイティ除去が行われていると判断することとした。

シミュレーションの結果はそれぞれ図5、図6のようになった。図の縦軸は測定点Cの位置、横軸は信号の到来方向すなわちパネルの角度、カラーバーはアンビギュイティ除去の成功率を表している。図5は位相測定における誤差の大きさを0度とした場合の結果で、図6は位相測定における誤差を-15度から15度の範囲でランダムに設定した場合の結果である。これらの結果において特徴的なのは、図5より測定点Cの位置を測定点Aから10cm、15cm、25cm、30cm、40cmと設定した場合には、位相測定誤差の大きさを0度とした場合でもアンビギュイティ除去に誤りが生じていることが確認出来る。一方で、位相測定における誤差を-15度から15度の範囲でランダムに設定した場合では測定点Cの位置を測定点Aから10cm、20cm、30cm、40cmとした場合では信号の到来方向が-30度から30度の範囲で、25cmとした場合では信号の到来方向が-10度から10度の範囲でアンビギュイティを確実に除去できており、それらの値以外では正しくアンビギュイティを除去できていないという結果になっている。この結果は、到来方向の候補の値に関係している。図7は測定点Cの位置を測定点Aから10cm、パネルの角度を10度、位相測定誤差の大きさを0度と設定した場合の到来方向の候補を表している。図17より到来方向の候補は、実際のパネルの角度と同じ10度方向でそろっていることが確認出来るが、一方で実際のパネルの角度とは異なる-58度方向にも到来方向の候補がそろっていることが確認出来る。そのため、位相測定誤差の大きさが0度の場合には、10度、-58度の二つの到来方向の候補において平均からの分散が0度となり、計算における有効数字や丸め込み誤差等の微小なずれが到来方向推定に影響を与えることとなるため、図5のような結果となった。また、位相測定において

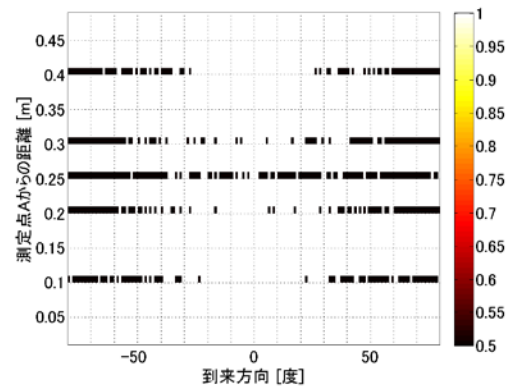


図5 測定点の数が3点の場合の到来方向推定におけるアンビギュイティ除去成功率（位相測定誤差の大きさが0度の場合）

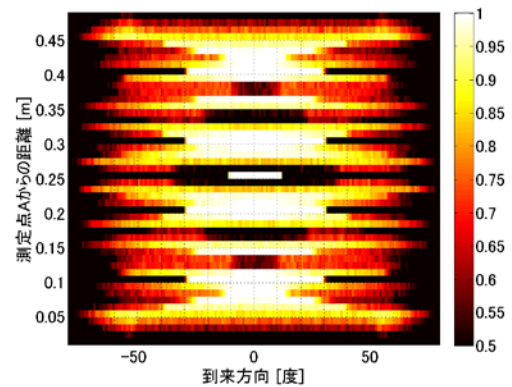


図6 測定点の数が3点の場合の到来方向推定におけるアンビギュイティ除去成功率（位相測定誤差の大きさが-15度から15度の範囲でランダムに設定した場合）

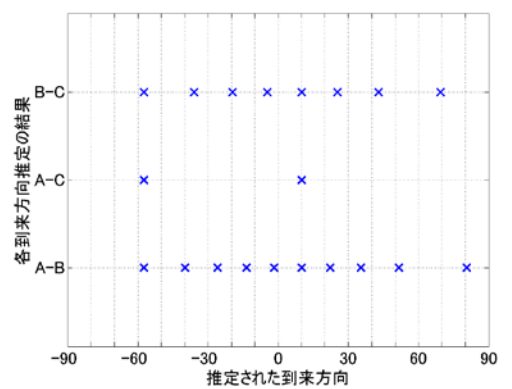


図7 測定点Cの位置を測定点Aから10cm、パネルの角度を10度、位相測定誤差の大きさを0度とした場合のアンビギュイティを含めた到来方向の候補

誤差存在する場合には、位相測定誤差によって生じる到来方向推定の誤差は0度方向に近いものほど小さくなる傾向がみられるため、到来方向推定の候補の中から最も0度方向に近い組み合わせが、真の到来方向として選択されることとなる。同様のことは測定点Cの位置が測定点Aの位置から20cm, 25cm, 30cm, 40cmの場合にも発生している。また、図6を見ると測定点Cの位置が前述の特殊な値以外の場合では、位相測定誤差の影響が大きく、アンビギュイティ除去における誤りが発生しやすいことが確認出来る。以上のことから、測定点が3点の場合には、アンビギュイティ除去の目標を達成することが出来ないことが分かった。

3.3. 位相測定点が4点の場合

測定点が3点の場合では、目標を達成することが出来なかったため、測定点が4点の場合について検討を行うこととした。位相測定点の配置は図8のように、パネルの両端に測定点A, 測定点Bを配置し、測定点C, 測定点Dをパネル上の任意の点に配置するものとした。到来方向推定の手順は、測定点が3点の場合の手順と同様としている。このとき位相測定誤差が0度の場合と-15度から15度までの範囲でランダムに設定した場合について、到来方向推定のアンビギュイティの除去成功率を計算している。成功率の計算法と成功の判定についても測定点が3点の場合と同様としている。

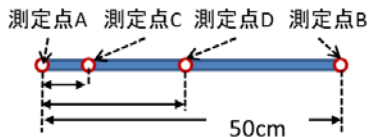


図8 位相測定点が4点の場合のモデル

シミュレーションの結果は図9, 図10となった。ただし、測定点Cの位置を測定点Aから10cmとした場合である。また図の縦軸は測定点Dの位置を表しており、横軸は信号の到来方向すなわちパネルの角度、カラーバーはアンビギュイティ除去の成功率を表している。図9より、測定点が4点の場合でも測定点の配置によっては、測定点が3点の場合と同様に、位相測定誤差の大きさが0度の場合に正しくアンビギュイティを除去できない部分が存在していることが確認できる。一方で、図10より測定点の数が増えたことで、測定点が3点の場合と比較して、全体的に位相測定誤差による影響を受けにくくなっていることが分かる。また、測定点Dの位置を測定点Aから25cmとした場合などで、パネルの角度が-60度から60度の範囲で正しくアンビギュイティ除去が可能であることが分かる。こ

のことから、位相測定点を4点にすることにより、アンビギュイティ除去の目標を達成することが出来ることが分かった。

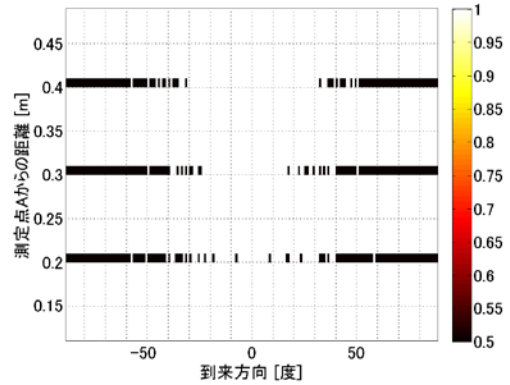


図9 測定点の数が4点、測定点Cの位置を測定点Aから10cmとした場合の到来方向推定におけるアンビギュイティ除去成功率（位相測定誤差の大きさが0度の場合）

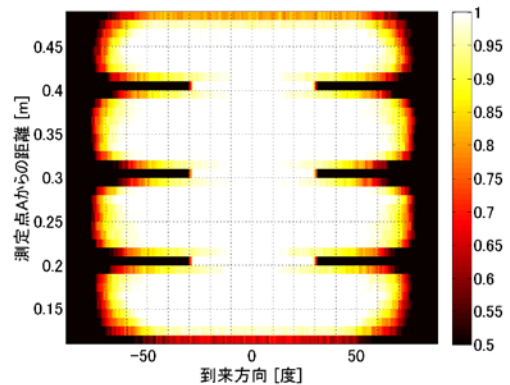


図10 測定点の数が4点、測定点Cの位置を測定点Aから10cmとした場合の到来方向推定におけるアンビギュイティ除去成功率（位相測定誤差の大きさが-15度から15度の範囲でランダムに設定した場合）

4. パネル平面度維持技術を用いたアンビギュイティ除去の検討

前章では、測定点の数を増やすことによるアンビギュイティ除去について述べた。本章では、パネル平面度維持技術を用いる方法について述べる。パネル構造を持つSPSについてはパネル展開および平面度維持に関する研究が行われた。この研究では、実験により隣接パネル間の角度の差の大きさを5度以下に抑えることを可能とした[4]。そこで、パネル角度推定におけるアンビギュイティ除去の方法として、測定点の数が3

点の場合に、平面度維持技術および隣接パネルの角度を用いた手法について検討を行った。到来方向推定の手順は測定点が3点の場合とほぼ同様であるが、到来方向の候補のうち、隣接パネルの角度に対して ± 10 度の範囲に収まるもののみを考慮するものとしている。このとき前節と同様に、位相測定誤差が -15 度から 15 度までの範囲でランダムに設定した場合の、到来方向推定のアンビギュイティの除去成功率を計算した。成功率の計算法と成功の判定については3節と同様としている。

シミュレーションの結果は図11、図12となった。図の縦軸は測定点Cの位置を表しており、横軸は信号の到来方向すなわちパネルの角度、カラーバーはアンビギュイティ除去の成功率を表している。また図11は隣接パネルの角度が0度の場合、図12は隣接パネルが60度の場合の結果である。これらの結果から測定点Cの位置を測定点Aから25cm等とすると、パネルの角度が隣接パネルの角 ± 8 度程度の範囲で正しくアンビギュイティの除去が可能であることが分かった。よって、パネル平面度維持技術を用いた場合には、隣接パネルの角度の情報を利用することで、測定点が3点の場合にもアンビギュイティ除去の目標を達成できることが分かった。

一方で、パネル平面度維持技術を用いた手法は、少なくとも1枚のパネルの角度を独立で求めている必要があることがわかる。そこで、実際のSPSシステムへの適用を考えると測定点が4点の場合の到来方向推定と組み合わせて使うことを提案する。これにより、測定点が4点の場合と比較して、SPS全体での位相測定点の数を減らすことが可能となる。

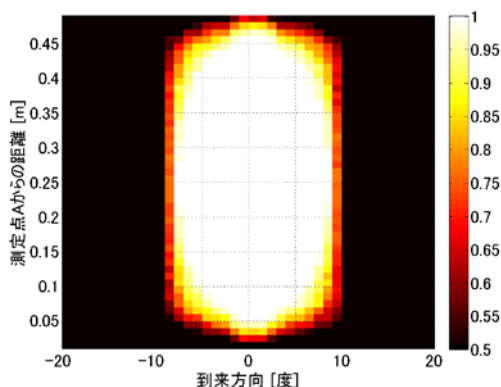


図11 隣接パネルの角度が0度の場合のパネル平面度維持技術を用いたアンビギュイティの除去成功率

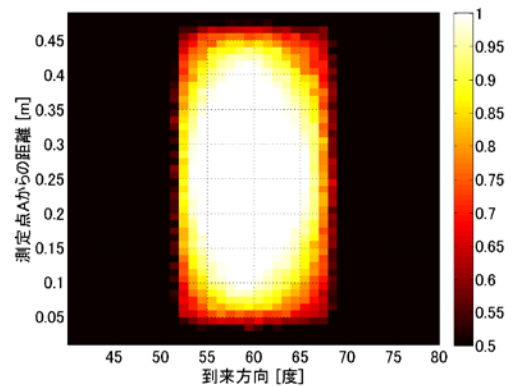


図12 隣接パネルの角度が60度の場合のパネル平面度維持技術を用いたアンビギュイティの除去成功率

5. まとめと今後の予定

今回行った検討においては、PAC法を実際のSPSに用いる際に問題となる到来方向推定のアンビギュイティの対策について、1D配置のSPSモデルでシミュレーションによる検討を行った。結果として測定点が4点のものと平面度維持技術を用いた測定点3点のものを併用することで、SPS全体での測定点の数を減らしながらも、十分にアンビギュイティを除去した到来方向が可能であることが分かった。これにより位相測定誤差やパネルの角度の大きさが大きい状況でもPAC法によるビームの補正を行うことが可能となった。今後はこれらの結果について、実験により評価を行っていくとともに、測定点の配置が送電に与える影響なども含め検討を行っていく予定である。

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”, Mar. 2008.
- [2] 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会講演集, 1S13, Nov. 2010.
- [3] T. Ishikawa and N. shinohara, “Study on Optimization of Microwave Power Beam of Phased Array Antenna for SPS,” Proc. of IEEE MTT-S IMWS-IWPT2011, 2011.
- [4] 山口哲史, 田中孝治, 佐々木進, 小田原修, “SPS実証衛星のパネル展開への応用に向けたSMAアクチュエーターの基礎研究”, 第29回宇宙エネルギーシンポジウム, Feb. 2010.

