

Proposal for Output Phase Calibration Method for Phased Array Antenna of Panel-structure SPS¹

Takaki Ishikawa, Naoki Shinohara

Research Institute for Sustainable Humanosphere (RISH), Kyoto University

Postal address: Gokasho, Uji, Kyoto, 611-0011, Japan

A Solar Power Satellite/Station (SPS) is a gigantic satellite designed as an electric power plant orbiting in the Geostationary Earth Orbit. In Japan, a panel-structure SPS was proposed. In this model, a phased array antenna, which consists of a lot of patch antennas, is used as a transmission antenna. In order to achieve high beam direction control accuracy of the phased array antenna, we have to control output phases of each antenna element.

In this study, we proposed an output phase calibration method for a phased array antenna of the panel-structure SPS. In this method, we directly connect a waveguide with a patch antenna, which is an antenna element of the panel-structure SPS, and measure a radiated microwave. By using this method, we can measure the radiated microwaves individually. However, a waveguide may affect a radiation of a patch antenna. Thus, we simulate and evaluate the accuracy of the proposed method. As a result of these simulations, the size of phase measurement errors is less than about 7 degrees and we can measure the output phases of phased array antenna of the panel-structure SPS with enough accuracy by using the proposed method.

¹ Presented at the 16th SPS symposium, 3-4, Oct., 2013.

パネル構造型 SPS における初期位相較正手法の提案¹

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

1. はじめに

SPS とは、静止衛星軌道に建造した太陽発電衛星において発電した電力を、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。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 と呼ばれるモデルがある。このモデルは、一辺が 50 cm 程度の発送電の機能をもったパネルを最小の構成要素とし、同様のパネルを多数並べることにより、一辺が数 km となる SPS を構成するモデルである。本研究では、テザー SPS の本体部分をパネル構造型 SPS と呼んでいる。パネル構造型 SPS の送電アンテナとしては、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たアンテナを用いる。このアンテナは、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により、送電マイクロ波のビーム形状や向きを制御することが可能なアンテナである。フェーズドアレーアンテナの高度な制御を行う上では、特に位相の制御を高い精度で行う必要がある。また、位相の高精度な制御を実現するためには、各送電用アンテナ素子における初期位相の較正が重要である。本発表では、今回新しく提案を行ったパネル構造型 SPS のフェーズドアレーアンテナにおける初期位相の較正手法について述べる。

2. 位相較正手法について

フェーズドアレーアンテナの位相較正手法としてよく用いられる手法の一つとして、REV (Rotating element Electric field Vector)法と呼ばれる手法がある。この手法は、フェーズドアレーアンテナのあるアンテナ素子の移相器のみを変化させた際の、受信位置での合成電界の振幅の変化を測定し、観測された振幅の変動から、移相器の位相を推定する手法である。しかし、この手法を SPS に適応する場合には、以下のような問題点が考えられる。

- 素子数が非常に多いため、較正に非常に多くの時間がかかる。
- REV 法は測定点の位置での位相が揃うように位相の較正が行われるため、各アンテナ素子から放射される位相が全て同相となるように較正するためには、各アンテナ素子と測定点の位置情報から経路長差による位相のずれを補正する必要がある。

SPS は宇宙空間を漂っていることから、各アンテナ素子の位置を固定することが困難である。また、アンテナ素子の位置を正確に求めることは非常に難しく、較正を行っている間の各アンテナ素子の位置情報をすべて求めて、経路長差による位相の補正を行うことは現実的ではない。以上の理由から REV 法を SPS のフェーズドアレーアンテナに適用することは困難であると考えられる。そこで本発表では、図 1 のように、パネル構造型 SPS のアンテナ素子であるパッチアンテナの表面に導波管を直接接続することによって、アンテナ素子からの放射を直接測定する手法を提案する。この手法の利点としては、各アンテナ素子からの放射を独立に測定することが可能であることや、導波管をアンテナに直接接続して測定するために、アンテナ素子や測定点の位置を考慮した補正が不要である点が挙げられる。一方で、パ

¹ 第 16 回 SPS シンポジウム、静岡大学にて 2013 年 10 月 3, 4 日開催

パッチアンテナに覆いかぶさるように導波管が配置されるために、導波管がパッチアンテナの放射に影響を与え、測定が正確に行えない可能性が存在する。そこでこの提案手法について、電磁界シミュレータ ANSYS HFSS を用いて、アンテナからの放射の振幅・位相の測定の精度について評価を行うこととした。

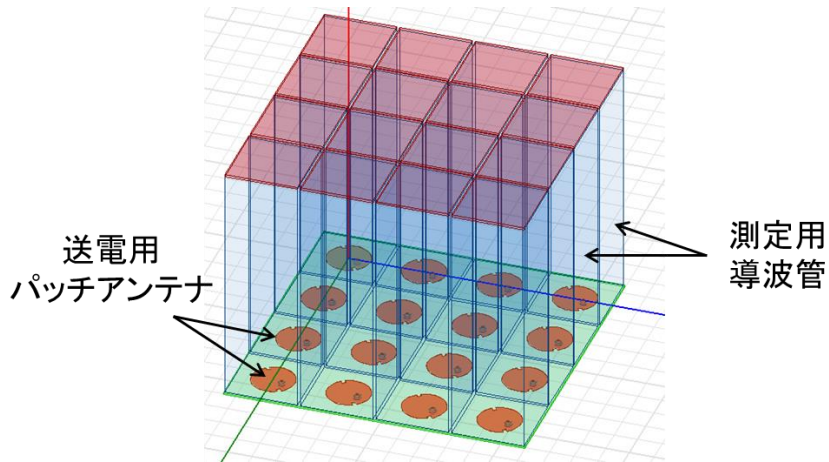


図1 提案手法のイメージ

3. 電磁界シミュレータによる評価検討

3.1. パッチアンテナの特性

提案手法の位相測定に関するシミュレーションを行うために、まず送電用のパッチアンテナの設計を行った。今回設計したパッチアンテナは、図2に示したように右旋円偏波の背面給電型円形パッチアンテナで、共振周波数は5.8 GHzとし、また給電用の線路には特性インピーダンスが50Ωの同軸線を用いている。設計したパッチアンテナの反射率を求めたところ、図3に示したように、5.8 GHzで約-28 dBとなった。パッチアンテナの放射パターンは、図4、図5となった。図4はパッチアンテナの右旋円偏波の放射パターンを3D表示にしたもので、図5はパッチアンテナの右旋円偏波と左旋円偏波についてφ=0°, 45°, 90°方向の放射パターンを2D表示にしたものとなっている。図4、図5より、アンテナ利得は約7 dBiとなっており、また、正面方向において、左旋円偏波の強度が右旋円偏波の強度に対して-30dBの大きさとなっていることから、右旋円偏波の放射が行われていることが確認出来る。

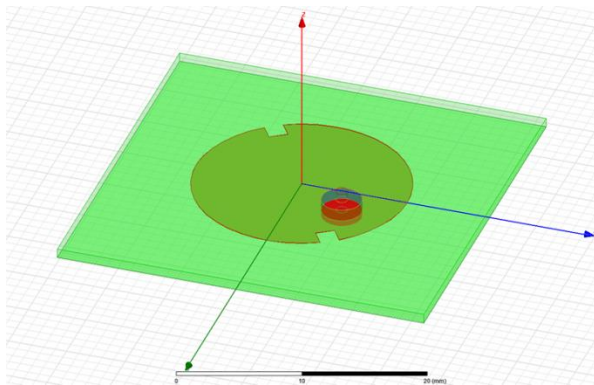


図2 パッチアンテナのデザイン

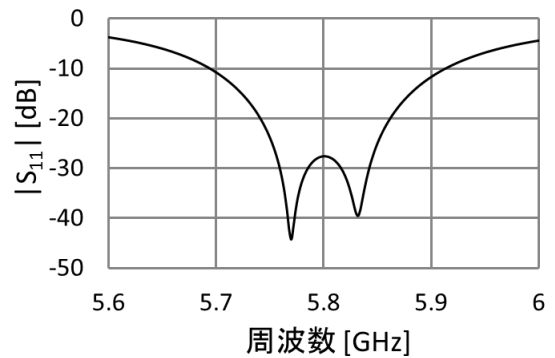


図3 パッチアンテナの反射率

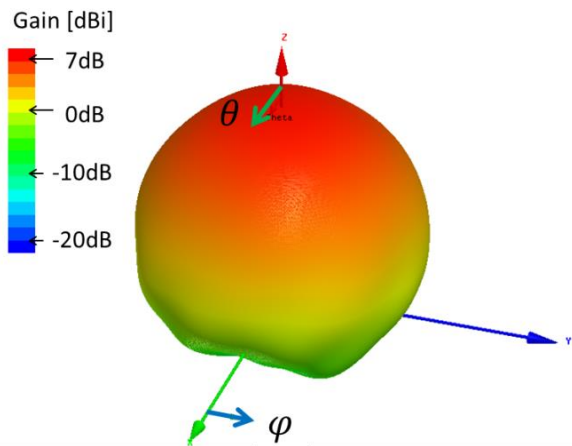


図4 パッチアンテナの放射パターン(3D表示)

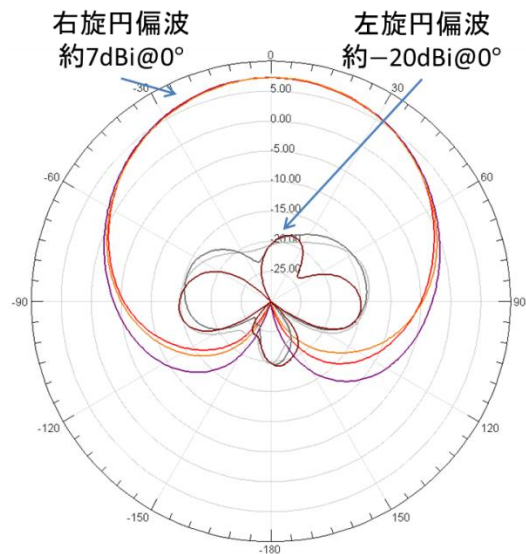


図5 パッチアンテナの放射パターン(2D表示)

次に、パッチアンテナに導波管を接続した場合の影響について検討を行った。接続する導波管は、断面が一辺の長さが 3 cm の正方形となっているもので、導波管の長さは 20 cm とした。この検討では、導波管のポートを Wave port として設定している。このとき、パッチアンテナの反射特性を求めたものが図 6 となった。図 6 より、送電アンテナの共振周波数が低周波側にずれている様子が確認できる。また図 7 には、パッチアンテナからマイクロ波の放射が行われている際の、導波管内部の電界ベクトルを描画したものである。図 7 の右図は、図 7 の左図を真上方向から見た場合の電界ベクトルである。図より、導波管を接続する前には、きれいな右旋円偏波が出ていたのに対して、放射の軸比が大きく変わっていることがわかる。この結果より、提案手法を用いた場合、パッチアンテナの放射の振幅や軸比の測定には不向きであることが推測できる。一方で、パッチアンテナから放射されたマイクロ波は導波管内部を伝搬していることが確認できるため、位相測定については、ある程度の精度で測定が可能であることが期待される。

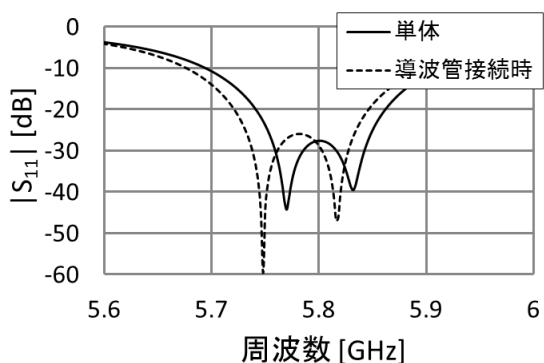


図6 導波管接続時の反射率

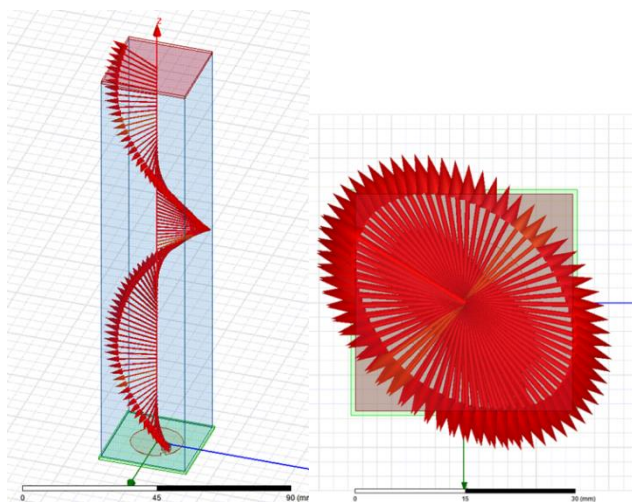


図7 導波管内部の電界ベクトルの様子

3.2. 提案手法を用いた位相測定に関する評価検討

提案手法を用いた位相測定の精度に関して検討を行った。また、実際の測定の状況を模擬するために、今回のシミュレーションでは、同軸導波管変換器を用いて、同軸部における電界の定常状態での振幅を測定し、位相測定の精度の評価を行うこととした。図6の左図は用いた同軸導波管変換器、図6の右図はシミュレーションを行ったモデルである。図6の右図に示すように、4つのアンテナにそれぞれ導波管を接続し、各アンテナへのマイクロ波の入力位相を変化させた場合の測定値を求めることで、位相測定精度の評価を行うこととした。

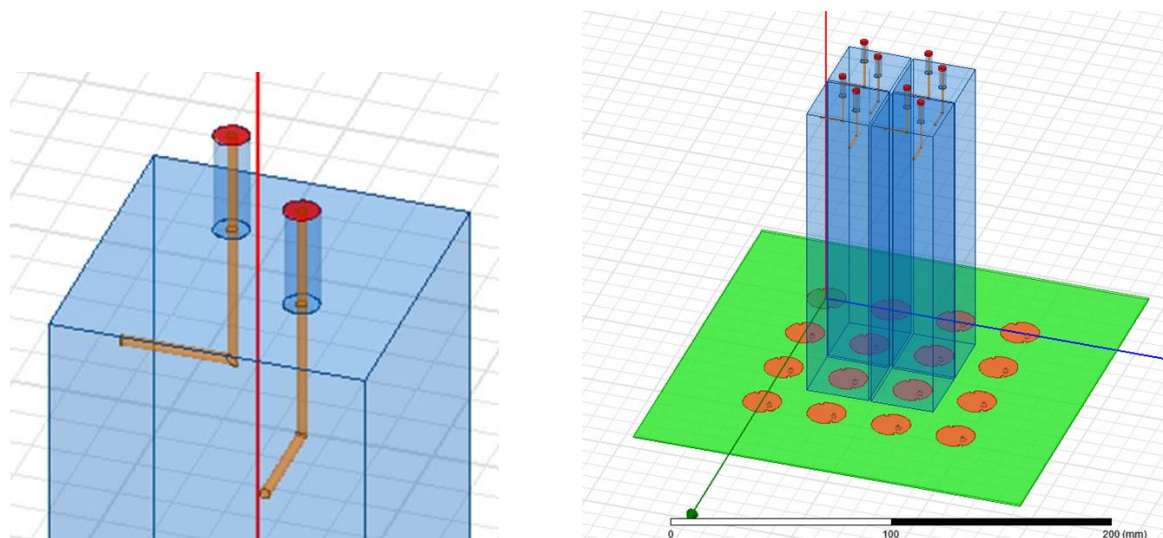


図6 同軸導波管変換器を用いたパッチアンテナの放射測定のモデル

同軸導波管変換器を用いた放射測定のモデルに関して、パッチアンテナの反射特性を求めたものが図7、同軸導波管変換器の反射特性を求めたものが図8となった。図7よりパッチアンテナの特性が、同軸導波管変換器を用いたことによっても変化していることが確認できる。また図8より、導波管にパッチアンテナを接続したことによって、同軸導波管変換器の特性も大きく変化していることが確認できる。

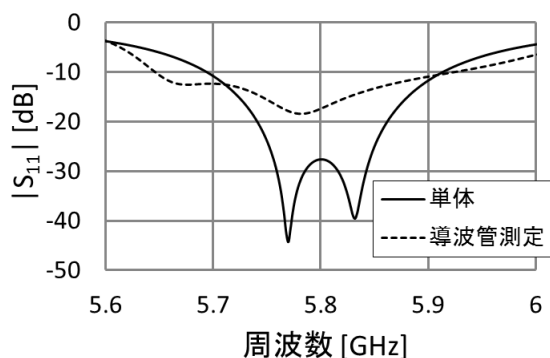


図7 パッチアンテナの反射特性

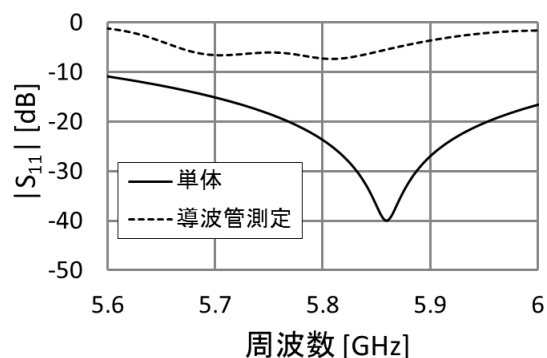
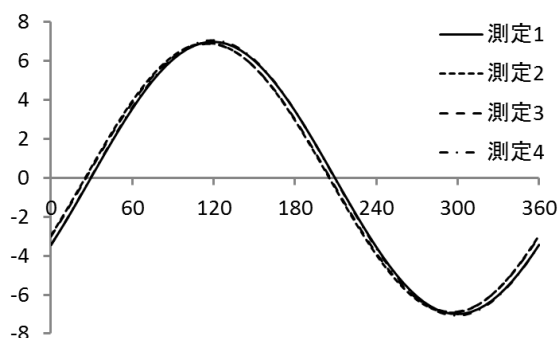


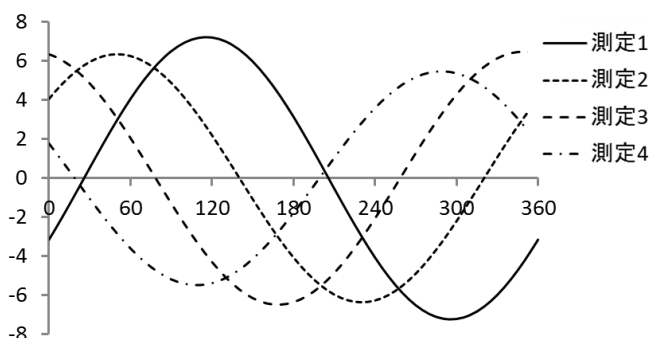
図8 同軸導波管変換器の反射特性

各アンテナに入力するマイクロ波の入力位相を変化させた場合の位相測定の精度についてシミュレーションを行ったところ、結果は図9となった。図9 (i)はアンテナに入力するマイクロ波の入力位相をすべて 0° とした場合の測定側の同軸線上での電界の変化を示した図で、図9 (ii)はアンテナに入力するマイクロ波の入力位相をそれぞれ 0° 、 60° 、 120° 、 180° とした場合の測定側の同軸線上での電界の変化を示し

た図となっている。また、いずれの場合についても、各アンテナに入力したマイクロ波の振幅はすべて一定の値とした。図 9 に示した結果について、同軸線上での電界の値が最大となる場合の位相を求めたときの結果を、表 1 に示した。表 1 では、各測定 of 位相について、測定 1 の位相との位相差についても求めており、この結果を用いて位相測定 of 精度に関して評価を行うこととした。位相差 of 計算結果から、提案手法 of 位相測定における誤差は、最大で約 7° 度となった。一方で、表 1 には、電界 of 振幅 of 最大値も示しているが、振幅 of 最大値に関しては、測定によってその値が異なるため、各アンテナからの放射電力を精度良く求めることはできないことが分かる。



(i) 入力位相が同相の場合



(ii) 入力位相がそれぞれ 0°, 60°, 120°, 180° の場合

図 9 測定側 of 同軸ポートにおける、受信電界 of 測定 of 結果

表 1 測定 of 結果 of のまとめ

(i) 入力位相が同相の場合

	1	2	3	4
位相 [°]	119.5	115.2	115.9	119.2
位相差	0	-4.3	-3.6	-0.3
振幅 [V]	6.99	6.92	6.88	7.06

(ii) 入力位相がそれぞれ 0°, 60°, 120°, 180° の場合

	1	2	3	4
位相 [°]	122.2	56.0	348	288.1
位相差	0	-65.5	-127.3	-186.8
振幅 [V]	7.23	6.35	6.48	5.47

4. まとめ

今回の発表では、パネル構造型 SPS を対象とした位相較正手法 of 提案を行った。今回手案した手法は、パネル構造型 SPS の送電アンテナ素子となるパッチアンテナ of 表面に導波管を直接接続することにより、各アンテナ素子からの放射を個別に測定する手法である。この手法は、複数 of アンテナ素子を独立かつ並列的に測定することが可能となるため、非常に大型 of フェーズドアレーである SPS の送電アンテナに適した手法であると考えられる。一方で、導波管によるアンテナ of 放射への影響が考えられるため、電磁界シミュレータ ANSYS HFSS を用いてシミュレーションを行い、提案手法 of 実用性についての評価・検討を行った。シミュレーション of 結果から、位相差 of 測定については最大で 7° 程度 of 誤差で測定が可能なが確認できた。一方で、各アンテナ素子からの入力電力に関しては、放射 of 軸比 of 変化などによる影響によって、精度良く求めることはできなかつた。以上 of 結果から、提案手法は SPS のフェーズドアレーアンテナにおける、各アンテナ素子からの放射電力 of 較正には用いることが出来ないが、各アンテナ素子からの放射位相 of 較正には使用することが出来る可能性を示せた。