Demonstration of Wireless Power Transmission Using Phased Array Antenna for SPS

Masashi TAKAHASHI[1] , Fumiya INOUE[1] ,Syotaro KATANO[2] , Ken-ichiro MAKI[3] ,
Kousuke KAWAHARA[3] ,Koji TANAKA[3]

[1] Tokyo University of Science 6-3-1 ,Niijuku,Katsushika-ku,Tokyo,162-8601 Japan

[2] Tokai University 4-1-1 ,Kitakaname,Hiratsuka-shi,Kanagawa,252-1292 Japan

[3]ISAS/JAXA 3-1-1 Yoshinodai, Chuo-ku, Sagamihara, Kanagawa, 252-5210 Japan

Abstract

Solar Power Satellite (SPS) is expected to be a future sustainable power system using a very large satellite. SPS requires a peculiar method that the energy generated in space is transmitted by the wireless technologies utilizing microwave or laser to the ground sites. The sunlight in orbit is unaffected by the weather and any time day or night, so the SPS is considered to be a stable and clean power system.

We are developing a breadboard model (BBM) for a wireless power transmission (WPT) demonstration experiment using a small scientific satellite toward a solar power satellite . The purposes of the SPS small satellite experiment are to establish a precise directional control method from the orbit to the ground and to clarify the effect of the plasma in ionosphere on microwaves. The model is used to evaluate a WPT mission instrument for the SPS small satellite. Furthermore, we made a prototype of microwave power amplifier modules utilizing the high efficiency GaN amplifier in order to evaluate a phase amplitude error caused by the temperature change.

In this report we describe the performances of the GaN amplifier module, and experimental results of the high power transmission experiments using phased array antenna system consisted of 32 sub-array elements. Also, we discuss about the amplification circuit to apply for a small scientific satellite experiment.

Presented at the 33rd ISAS Space Energy Symposium, 14th February, 2014

This document is provided by JAXA.

SPS の無線電力伝送のための
フェーズドアレーアンテナ試作試験

高橋将司[1],井上史也[1],片野　翔太郎[2],牧謙一郎[3], 川原康介[3],田中孝治[3],

[1]東京理科大学 [2] 東海大学 [3]ISAS/JAXA

1. はじめに

太陽発電衛星（SPS:Solar Power Satellite)とは、宇宙で太陽光発電した電力をマイクロ波やレーザーに変換して、地上に伝送・利用するという、宇宙に建設される発電所の構想である。これは宇宙空間を人類のエネルギー取得の場として利用しようとするものであり、クリーンで大規模なエネルギーシステムとして大きな可能性を持っている[1]。

2. 研究背景・研究目的

SPS にとって無線電力伝送は固有かつ重要な技術である。実用 SPS の送電アンテナは素子数が数十億個、大きさが２～３ｋｍのフェーズドアレーアンテナであり、軌道上において厚さ数ｃｍの発送電一体型パネルの形状は不安定と想定される。送電距離は静止軌道上からの場合約３６０００ｋｍで、その場合に要求されるマイクロ波ビーム指向精度は 0.0005 度であり、半径 2km 程度の範囲の地上受電施設へ向けてビーム形成を行う必要がある。この要求を満たすためには、(i)フェーズドアレーアンテナの位相と振幅を管理し、必要な精度で制御する技術、(ii)送電パネルの形状変形を機械的及び電気的に制御して正確なビーム形成を行う技術、(iii)源振が複数存在してなおかつ形状が変形するようなシステムにおいては放射マイクロ波の位相面を統一する技術が必要になる。

これらの技術課題を踏まえて、本研究は SPS のマイクロ波送電システムを作る上での指針を明らかにすることを目的とする。また SPS 小型衛星の設計指針や実証項目の検討も行う。

本研究では、マイクロ波デバイスである GaN 製のパワーアンプを試作し、それを用いてマイクロ波回路を構成し、回路システムの評価を行った。また、当研究室において開発した SPS のマイクロ波送電システムのブレッドボードモデル（BBM）による大電力送電実験を実施してフェーズドアレーアンテナシステムの評価を行った。

3. 試作マイクロ波回路システム

試作 GaN アンプの単体性能について説明する。図 1 に試作した GaN アンプ単体素子の外観を示す。開発したブレッドボードモデルに実装されている GaAs アンプと比較して、(ｉ) 出力電力・位相の温度依存性が小さい、(ii)デバイス間の温度依存性の個体差が小さい、(iii)電力付加効率が高い,という長所を持つ。(iii)に関しては単体効率が 70%を越えることを確認しており、回路の高効率化を期待できる。このアンプを用いて回路システムを試作した。図 2 に GaN アンプが実装されている高効率マイクロ波増幅基板の外観図を示す。パワーアンプ以外に実装されているデバイスは BBM の回路と同一のもので構成されている。回路のレベルダイヤグラムを図 3 に示す。システム総合回路効率は約 40 %程である。

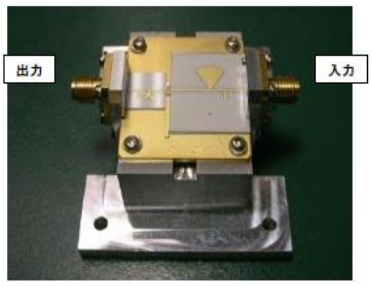

図 1 試作 GaN アンプ外観

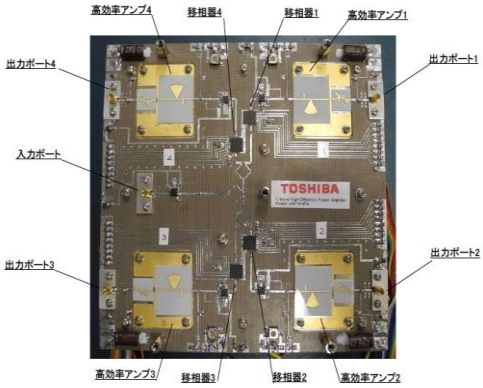

図 2 試作高効率回路システム

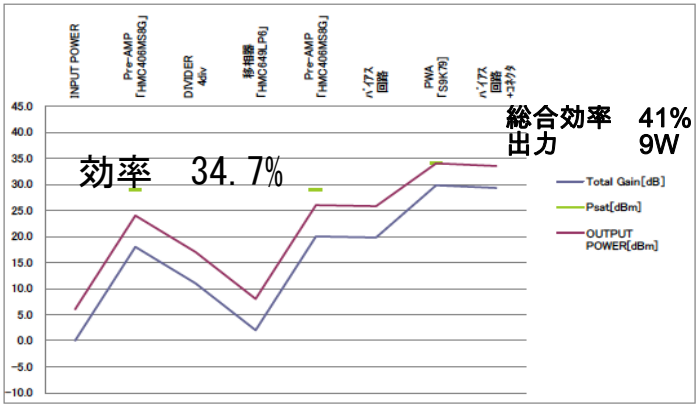

図 3　高効率回路システムレベルダイヤグラム

This document is provided by JAXA.

4. 回路システム評価試験

回路システムの評価として、真空環境下においてのシステムの出力電力・位相の温度特性を計測した。また、同時に送電システムの ON/OFF 切り替えと、高出力/低出力モードの切り替えによる出力への影響を検証する。このシステムの切り替え操作は小型衛星での実験シークエンスを考慮したものである。実験構成を図 4 に示す。測定は 1.3×10^-3 パスカルの真空環境下で行い、パワーアンプの温度をモニタしながらネットワークアナライザで回路の出力の振幅(出力電力)・位相を計測する。またマイクロ波回路を設置している真空チャンバ内の底面を水冷チラーによって冷却し、アンプの温度を制御する。高出力/低出力の切り替えはネットワークアナライザからの入力を操作することで行った。低出力モードの出力値は高出力モードの約 10 分の 1 の大きさとした。

GaN アンプの送電システムの ON/OFF の切り替え操作と高出力/低出力モード切り替え操作を行ったときのアンプ温度と出力の関係を図 5、図 6 にそれぞれ示す。システムの切り替え操作を繰り返しても温度が一定ならば出力値は同程度となった。この結果から、出力・位相に影響を与える主な要因はアンプ温度の変化であることを確認した。次に、複数の回路について温度特性の測定を行った。3 つの回路の出力・位相の温度特性のまとめをそれぞれ図 7 図 8 に示す。それぞれのデバイス間での出力・位相の絶対値に違いが生じているが、出力変動の相対値は出力と位相それぞれ約 -0.030 ～ -0.035 dBm/℃、 -0.28 ～ -0.41 deg/℃となり、ほぼ一致した結果が得られた。

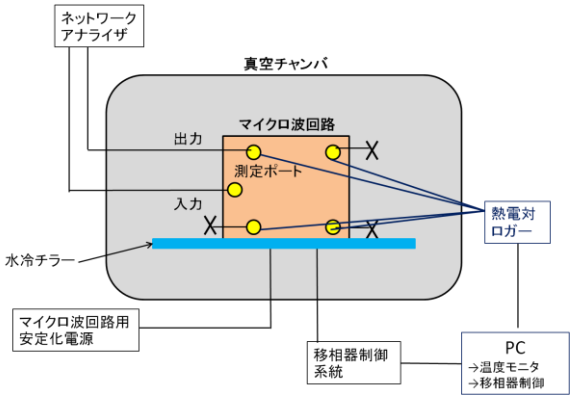

図 4　回路システム評価試験　実験構成

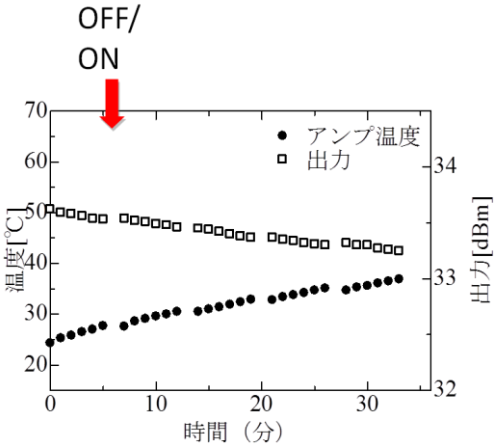

図 5　ON/OFF 切り替え 出力変化

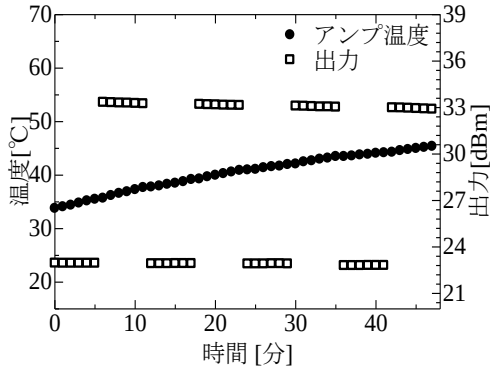

図 6　高出力/低出力切り替え 出力変化

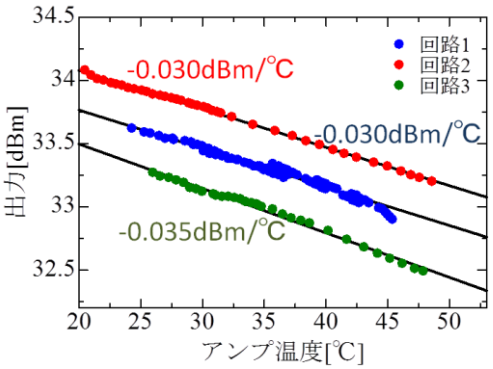

図 7 出力温度特性 3 回路比較

This document is provided by JAXA.

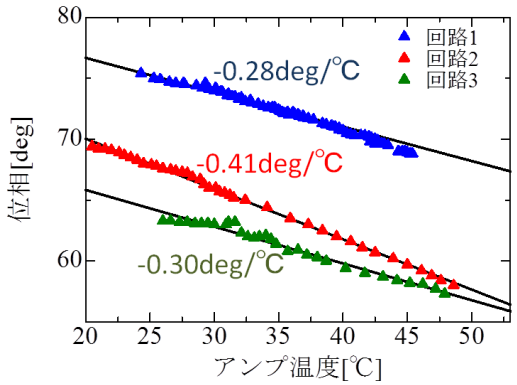

図 8　位相温度特性 3 回路比較

5. BBM フェーズドアレーアンテナによる大電力送電試験

4×8 の計 32 サブアレー(モジュール数 8)のフェーズドアレーアンテナで構成した BBM の送電実験を実施した。BBM 32 サブアレイ構成のブロック図を図 9 に示す。デジタル移相器の個数は出力ポート数（サブアレー数）に対応しており、 1 モジュールにつき 4 個で計 32 個である。

送電実験を実施する前に、各出力ポートの位相のバラつきの補正を行った。図 10 にアレーアンテナの外観を示す。補正方法は当研究室で製作した近傍界測定装置を利用した。位相補正の構成を図 11 に示す。近傍界装置は、XY ステージに受信アンテナを取り付けたものであり、リモートコントロールで二次元平面内を移動させることができる。ネットワークアナライザを BBM と近傍界装置の受信アンテナに接続し、フェーズドアレーアンテナの各アンテナ素子上の出力位相の計測を行った。

位相補正の有無により、標準偏差において 32.4 度から 1.96 度まで改善されたことを確認した。また、素子間の位相差の範囲を 9.5 度以内に収めることができた。また事前に計測した出力電力値は、32 素子間で約 1900 ～2900mW の範囲、平均は 2344 mW で、総出力は約 75W となった。

放射パターンの測定結果を図 12 に示す。結果は補正の有無でのパターンと、電磁界シミュレータ SONNET でのシミュレーション結果と合わせた。シミュレーション結果は同振幅・同位相で各アンテナ素子から RF を放射しているという条件でのパターンである。補正の有無でのパターンを比較すると、補正を行うことでピークでの振幅が 1.9 dB（ 54%）上昇したことが確認できた。また、このときのピーク位置での受信電力として 23.3 dBm （約 214 mW ）を得られた。補正後のパターンとシミュレーション結果を比較すると、メインローブの形状とヌル点の位置が良く一致していることが確認できた。この補正後のパターンの結果と得られた受信電力から、フェーズドアレーアンテナから放射された全電力を算出した。算出方法について説明する 。3 次元放射パターンの dB 値を電力値に直し、その体積を求める。その際、本測定では H カットの一面のみのパターンしか計測していないため、結果が良く一致していたことからシミュレーション結果のパターンを利用し算出した。放射電力の計算結果は、72.3 W となった。事前に測定したアレーアンテナへの供給電力は約 75 W であるが、この損失は出力ポートからアンテナへ接続するためのケーブルやコネクタのロスのために生じたと考えられる。

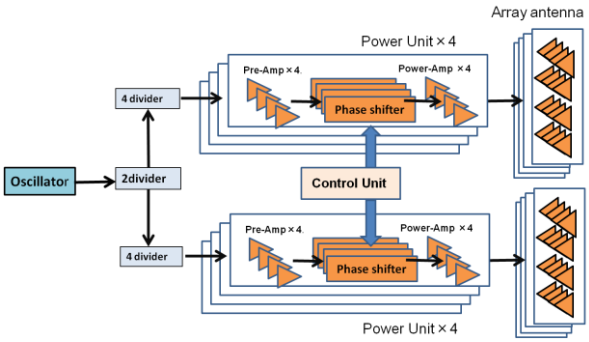

図 9　BBM ブロック図

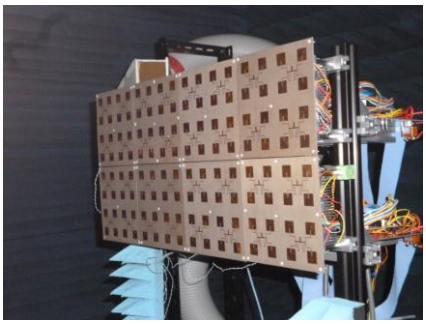

図 10 フェーズドアレーアンテナ外観

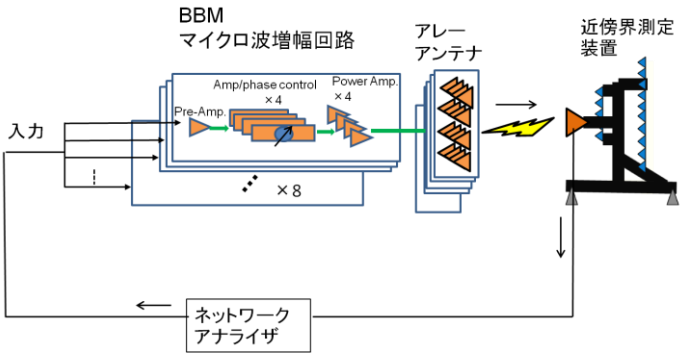

図 11 近傍界測定での位相測定　構成図

This document is provided by JAXA.

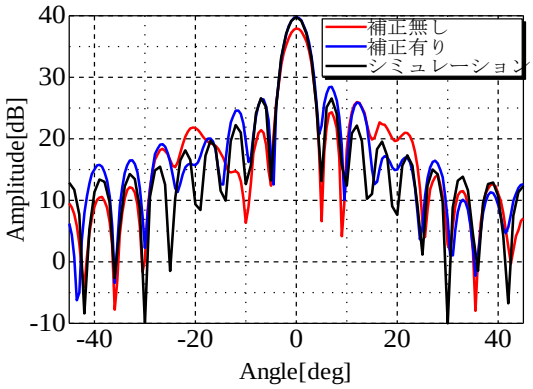

図 12 放射パターン測定結果

6. 考察

小型衛星の長距離ビーム方向制御実証では、512 素子のアンテナと 5 ビット移相器で目標ビーム方向制御精度 1.0° を達成することを目標としている。また、位相誤差の目標制御精度は 5 ビット移相器の量子化誤差範囲である 11.25° 以内としている。振幅は、小型衛星実験の受電局において数%のオーダーで影響を評価したいと考えているため、送電システムの振幅もそれ以下の精度で管理する必要がある。

回路システムの評価試験結果から、送電システムの出力振幅・位相の主な要因はデバイスの温度変化であることが確認できた。また 3 段構成の GaAs アンプを用いた BBM の回路と比較して、GaN アンプでの試作回路システムの方が各素子毎の温度特性のバラつきが少ない。その変化量も 1/3 程度に抑えられることを確認できた。これは、GaN アンプが単体構成のためと考えられる。GaN アンプは特注品であり、GaAs アンプは一般品である。バラつきはそのためと考えられるが、SPS の回路システムにおいては試作 GaN アンプ程度の品質管理が求められる。このアンプを実装した場合を考えて小型衛星の要求仕様について検討する。試作 GaN アンプを用いた高効率回路システムの温度特性を表 1 にまとめた。位相・振幅の変化量は 3 回路の測定値のうちの大きい値（ワーストケース）を記している。もし温度を 1℃の精度でモニタ・制御できれば、位相は 0.41° 、振幅は 1% 以下の精度で制御できることを確認した。また温度変化を 25℃以内に抑えることができれば位相の変化誤差を目標誤差範囲に抑えることができる。

次にビームの指向精度について述べる。アレーアンテナの各素子から同振幅の出力がされている場合ビーム指向誤差の標準偏差は次の式から求められる。[2][3]

$$\Delta\theta = \sqrt{\frac{12}{N^3}}\,\phi \qquad (1)$$

N は測角方向のアンテナ素子数、ϕ は位相誤差の標準偏差である。この式から SPS 小型衛星のビーム制御精度について検討する。小型衛星の全素子数から N =25 として ϕ に対する $\Delta\theta$ の関係を図 16 に示す。またビーム指向誤差の範囲の目安として $\Delta\theta$ の $\pm 1 \sim 3\sigma$ の範囲の計算結果についても図 13 に示した。目標のビーム方向制御精度 1.0 を達成するためには、誤差範囲を $\pm 2\sigma$ の範囲と考えると、位相誤差の標準偏差 ϕ を 9.0° 以内に, 抑えなければならない。ただし、このビーム指向誤差に加えてレトロディレクティブシステムによる方向検知誤差も考慮しなければならない。それについては今後検討する必要がある。

表 1 高効率回路システム 出力温度特性まとめ

アンプ温度変化 [℃]	位相変化量 [deg]	振幅変化量 [dB]	振幅変化率 [%]
1	0.41	0.035	0.80
10	4.1	0.35	7.74
20	8.2	0.7	14.89
25	10.25	0.875	18.25
30	12.3	1.05	21.48

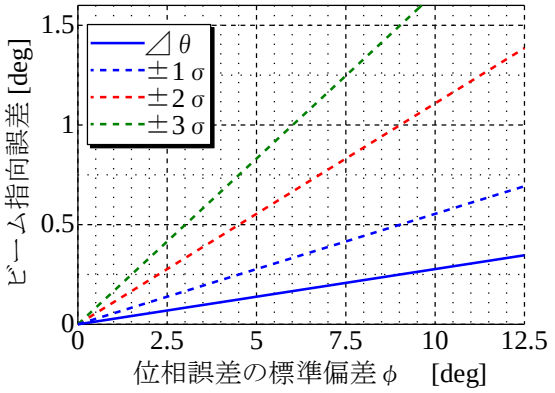

図 13 小型衛星 位相誤差とビーム指向誤差の関係

7. まとめ

SPS 小型衛星による実証実験の実施を検討しており、その前段階として当研究室では SPS 小型衛星の送電システムのブレッドボードモデルを開発し、衛星実験や実用 SPS のためのデータ取得試験を行っている。

今回は新たに試作した GaN アンプで構成した回路で、マイクロ波回路システムの評価試験を行った。その結果、出力位相・振幅の主な変動要因はマイクロ波デバイスの温度変化であることを確認した。また、BBM 32 サブアレーでフルパワーでの送電実験を実施した。その結果から、BBM から約 72W の電力が放射されたことを確認でき、今後実施される予定である 70~80W 以上での屋外実験等の電力送電試験に向けての性能確認が行えた。

参考文献

[1]. S. Sasaki, K. Tanaka, and AMR Group,"JAXA Activities for SSPS Research," 28th ISTS, Okinawa, 2011-q-02 (2011)
[2]. Robert J. Mailloux :2005“Phased Array Antenna Handbook”Artech House.
[3]. James R.Wertz , Wiler J. Larson:1999“SPACE MISSION ANALYSIS AND DESIGN”springer

This document is provided by JAXA.