

Evaluation of the Effect of the Phase Error on Microwave Power Transmission Performance for SPS Small Scientific Satellite

Masashi TAKAHASHI¹, Fumiya INOUE¹, Koji TANAKA², Ken-ichiro MAKI², Susumu SASAKI²
Kousuke KAWAHARA², Kengo MIYASHIRO³, Kimiya KOMURASAKI³,

¹ Tokyo University of Science 6-3-1, Nijuku, Katsushika-ku, Tokyo, 162-8601 Japan

² ISAS/JAXA 3-1-1 Yoshinodai, Chuo-ku, Sagami-hara, Kanagawa, 252-5210 Japan

³ Tokyo University

Abstract

We are developing a breadboard model (BBM) for a wireless power transmission (WPT) space demonstration experiment using a small scientific satellite toward a solar power satellite (SPS). J-spacesystems and JAXA are proceeding with the ground-based WPT experiment. The WPT space demonstration experiment is planned as the next phase in the research road map toward the practical SPS. The purposes of the SPS small satellite experiments 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 BBM that consists of microwave oscillator, amplifiers, the phase control system of radiation elements and phased-array antennas is used to evaluate a performance of the WPT mission instrument for the SPS small satellite. We carried out the microwave WPT experiment using the BBM and evaluated the accuracy of the beam directional control and the beam forming.

This report presents evaluations of the effects of the phase errors in the microwave circuits of the BBM due to the individual difference and manufacturing error among the devices. The phase pattern of radiated microwave from the phased-array antenna is measured utilizing the near-field microwave measurement system. We evaluated non uniformity of the phase errors and adjusted the phase used by the digital phase shifter connected to each sub-array antenna element. Furthermore, the effect on the beam directivity characteristics is evaluated from the far-field radiation pattern. In addition, we discuss about the phase control and amplification circuit for the space demonstration using a small scientific satellite. We made the high efficiency GaN amplifier and evaluated an energy efficiency of the circuit with the GaN amplifiers.

太陽発電衛星のブレッドボードモデルにおける 位相誤差による送電性能への影響評価

高橋将司¹,井上史也¹,田中孝治²,牧謙一郎²,佐々木進²,川原康介²,宮代健吾³,小紫公也³,

¹東京理科大学 ²ISAS/JAXA ³東京大学

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、宇宙に建設す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有している。

2. 研究背景・研究目的

我々は、SPSの実用的なシステムの完成と運用を最終目標とし、SPSの要素技術開発として小型衛星を用いた宇宙-地上間マイクロ波ビーム制御能力及びプラズマと大電力マイクロ波との相互作用の検証実験を行うことを検討している。現在、その準備段階として小型衛星に搭載する送電システムに関するブレッドボードモデルを開発しており、これを利用した地上/低高度における基礎実験、また衛星搭載用の熱構造評価を行う予定である。[1] 小型衛星による実験では、数百素子から構成されるフェーズドアレーアンテナを使用し、ビーム方向制御とビーム形成を行なう。精度の高い実験のためには、アンテナ各素子間の位相関係を正確に調整する必要がある。

SPSの送電システムはアンプや移相器などのマイクロ波素子で構成され、これら各マイクロ波素子に個体差や製作精度等による位相誤差 $\Delta\phi$ が存在している。アンプに関しては温度依存性も存在しており、他にも線路長によっても位相誤差が生じる原因となる。

そこで、本研究の目的としてフェーズドアレーアンテナの素子間の位相誤差の影響を検証する。地上実験用に開発しているブレッドボードモデル1/4部分における位相の不均一性を測定し、放射パターンへの影響を評価した。さらにモデルに実装している6ビットデジタル移相器によって各出力を補正し、等位相面の最適化を図った状態で、遠方界、近傍界両方の放射パターンを測定し、その効果について検証した。また、SPSの小型衛星に向けた位相誤差の抑制、高効率化を目指した増幅部回路の検討も行なった。

3. ブレッドボードモデルの構成

図1に、現在開発しているマイクロ波送電装置のブレッドボードモデルの1/4部分の構成をブロック図で示す。発振器から出力された周波数5.7GHzのマイクロ波は4分配され、4つの回路モジュールにそれぞれ入力される。各モジュールでは、まず増幅器を介して増幅され、2分配を2回繰り返し、4つのポートに分岐される。各ポートでは、6ビットデジタル移相器、前置増幅器、電力増幅器の順でマイクロ波が増幅、位相制御され、モジュールから出力される。各ポートからの最大出力電力は平均して3.6Wである。そして、これら出力ポートには4素子のサブアレーアンテナが接続される。このとき、全体で縦4素子、横16素子、計64個のアンテナ素子からマイクロ波が放射される。全体の寸法は縦158mm、横632mmである。

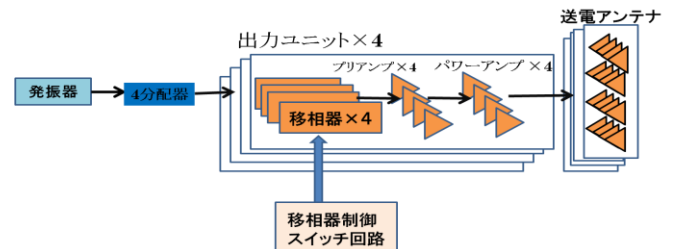


図1 ブレッドボードモデル モデル図

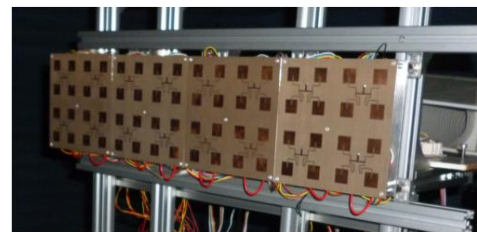


図2 ブレッドボードモデル外観

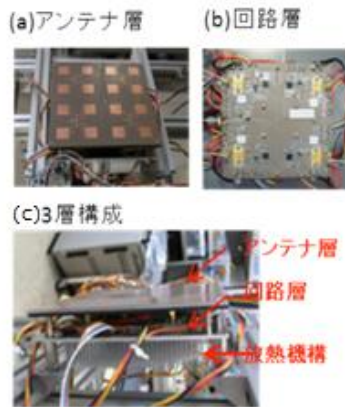


図 3 ブレッドボードモデル構造

図 2, 3 にブレッドボードモデルの外観及び構造をそれぞれ示す。本モデルは 3 層構造を有する薄型パネルで構成される。各層にはそれぞれ異なる機能を持つ機器が搭載されている。第 1 層は、送電アンテナ、第 2 層は増幅・位相制御回路、第 3 層は放熱器である。

次に、本論文で最も重要な要素である位相制御手法について説明する。回路モジュールの各ポートに実装されている移相器は、小型の MMIC (Monolithic Microwave Integrated Circuit) であり、入力する 6 ビットのデジタル信号により、通過位相を $0 \sim 2\pi$ rad の範囲で制御することが可能である。具体的には、各サブアレーアンテナにつき一つの移相器が接続されており、それぞれ縦に並ぶ 2 つのサブアレーに対応する移相器には同一のデジタル信号が入力され、横方向に並ぶ 8 組のサブアレー対に対して、出力位相の調整が成される。

4. 近傍界測定

ブレッドボードモデルの各送電アンテナ面からの位相分布を近傍界測定装置を用いて測定した。本実験は京大生存圏研究所マイクロ波エネルギー伝送実験装置 (METLAB) にて行った。

測定は出力の位相を揃えるように補正を行う前後での 2 パターン行った。その位相の補正方法について説明する。まず、基準値に対する各素子の位相差を測定し、その位相差と同等の移相量を補正量とする。そして、ビーム走査を行うために必要な移相量にこの補正量を加える。この補正操作はブレッドボードモデルに実装されている 6 ビットデジタル移相器で行う。なお、本実験では縦に並ぶサブアレー対に同一の信号を入力する構成になっていることから縦に並ぶ 2 つのサブアレーそれぞれの位相差の平均値を補正に用いることにする。また、使用するデジタル移相器には量子化誤差が存在しており補正の目標値に最も近くなる

ように調整することになる。

図 4 に送電アンテナ面における位相分布を示す。目標ビーム方向は 0° (正面) である。走査範囲内の 2 次元座標において、位相を色の違いで表示しており、図中の黒枠は送電アンテナが存在する範囲を示している。補正精度は横方向 (x 方向) のポート間において標準偏差で 10° 以内とした。図 4(a) の位相補正前の分布においては全体的に色のバラつきが大きく、標準偏差は 13.1° となった。それに対し補正後の測定結果である図 4(b) では図における色の単一性も増していることが確認でき、標準偏差も 9.2° となり、目標を達成した。

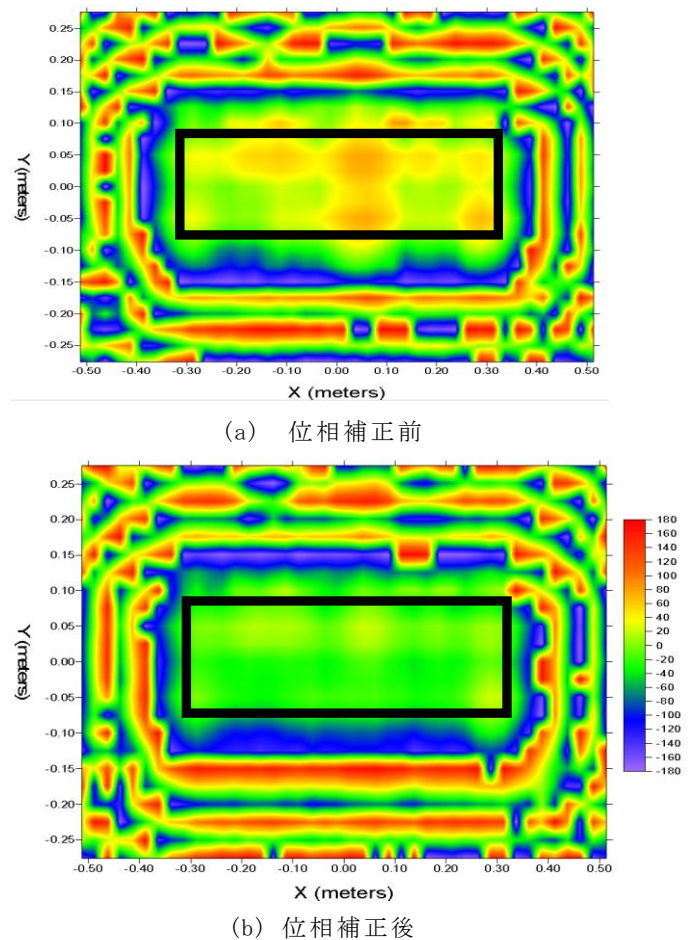


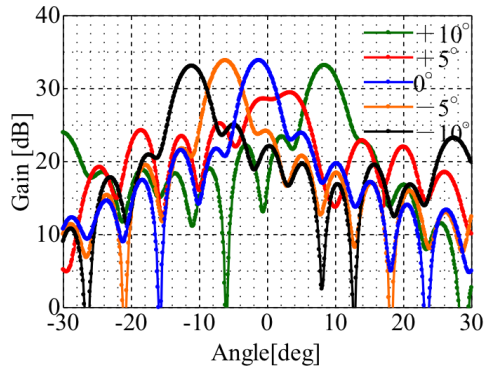
図 4 位相補正の有無による各送電アンテナ面の位相分布

5. 遠方界測定

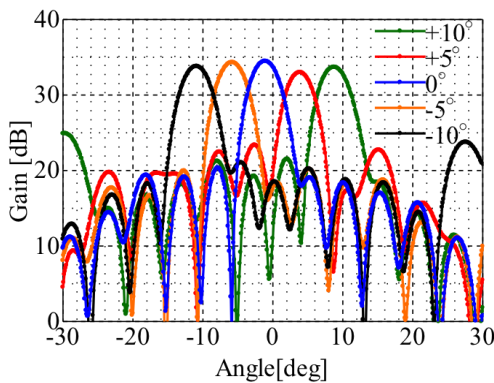
前節で説明した実験と同じ条件でブレッドボードモデルの遠方界放射パターンを測定し、位相補正の有無による放射パターンへの影響を検証した。また、各出力ポートの位相を調整し特定の方向にビームを走査した際のビームパターンも測定した。

図 5 にビームを 0° 、 $\pm 5^\circ$ 、 $\pm 10^\circ$ の 5 通りの方向を目標に走査した際のそれぞれの補正前後のビームパターン測定結果を示す。また、この時のビーム方向の

目標値と実測値の誤差を図6に、また第一サイドローブの補正前に対する補正後の相対値を図7に示す。補正前の目標角と実測値の誤差が平均3.5%なのに対し、補正後は2.5%に低減されていることが確認できた。サイドローブに関してはどの目標走査角においても低減していることがわかる。第一サイドローブについては、補正前に対し補正後では右、左それぞれ平均5.7dB, 1.9dBの低下が確認できた。



(a) 補正前



(b) 補正後

図5 位相補正の有無による走査ビーム放射パターンの比較

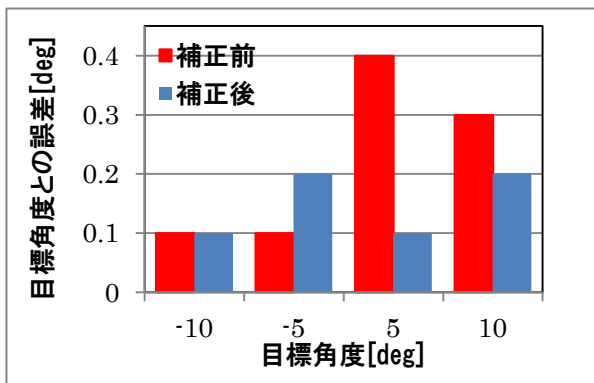


図6 各目標角度と実測値の誤差

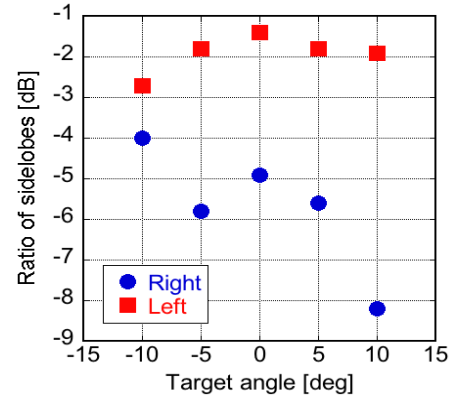


図7 各目標角度での第一サイドローブ強度比

6. 考察

一次元方向についてビーム方向誤差 σ_θ は

$$\sigma_\theta^2 = \frac{4\sigma^2}{N \left(\frac{\pi D}{\lambda} \cos \theta_0 \right)^2} \dots (1)$$

で表される。ここで σ は位相誤差の標準偏差、 N はアンテナ素子数、 D はアンテナ開口径、 θ_0 は目標角である。[2] この式を用いて、今回の測定アンテナの条件と、測定値の位相誤差の標準偏差 $\sigma = 9.2$ を代入し、目標角度 $\theta_0 = \pm 5^\circ, \pm 10^\circ$ の場合を計算すると、ビーム方向誤差 σ_θ は約 0.2° となり測定値とほぼ一致している。またこの計算を小型衛星の規模に拡張すると、ビーム方向誤差は約 0.01° となる。位相誤差を今回の補正の目標値である $\sigma = 10^\circ$ 以内にできれば、走査角度 10° 以内の範囲で、誤差を 0.05° 以下にでき、小型衛星における実験で満足できる精度を得られる。

位相誤差をこの程度まで抑制するには、増幅器の発熱等の温度変化による位相変化を制御することが大きな課題の一つになる。図8は現在ブレッドボードモデルに実装されている GaAs のパワーアンプの温度と1モジュール分の各出力の移相量の関係である。各出力で温度係数にバラつきがあり、 10°C 毎に $4 \sim 12^\circ$ 位相が変化してしまうことがわかった。そこで、現在小型衛星用に GaN アンプを試作しており、その外観図と温度と移相量の関係を図9, 図10に示す。この試作 GaN アンプの温度変化による移相量の変化は 10°C 毎に約 1.4° であり、GaAs のアンプより改善される。また、この二種類のアンプを用いた場合のブレッドボードモデル1モジュールの増幅部回路のレベルダイアグラムを図11に示す。アンプ単体の電力付加効率についても GaAs は約21%、回路の総合効率は約17%なのに対し、試作 GaN は約75%、回路全体の総合効率は約50%となり、増幅部回路の高効率化も図れることが期待できる

ことから小型衛星に用いる増幅器として検討している。

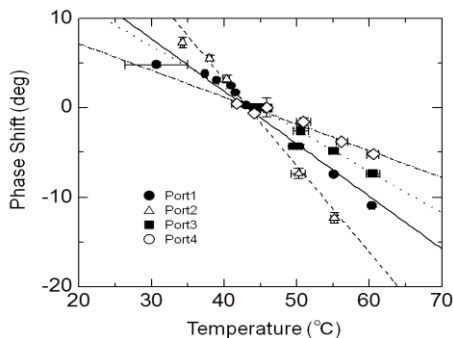


図 8 アンプの温度と各出力の位相量の関係

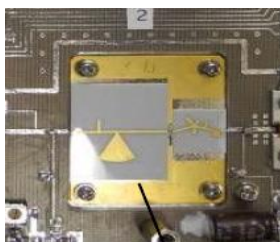


図 9 試作 GaN パワーアンプ外観図

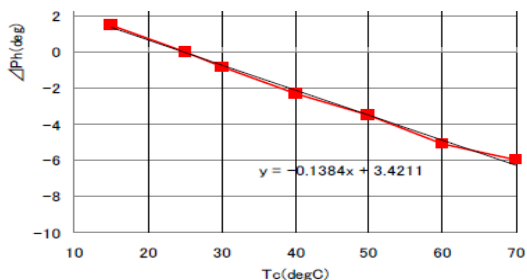


図 10 試作 GaN アンプの温度と移相量の関係

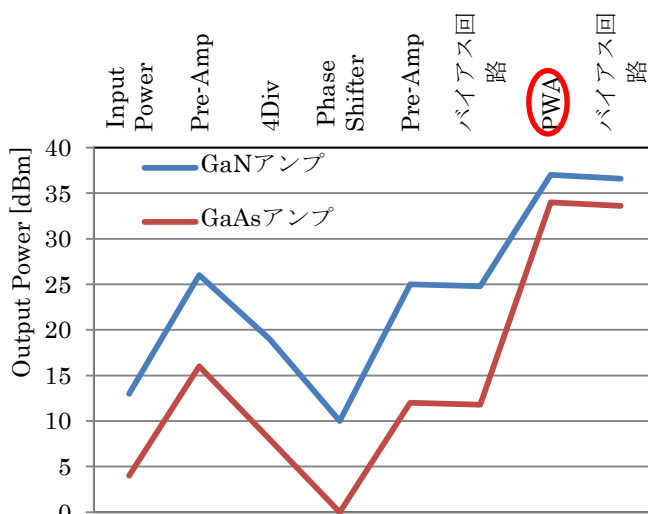


図 11 回路のレベルダイアグラム

7. まとめ

我々は太陽発電衛星における無線電力伝送の技術実証として地上で実施する送電実験で用いるブレッドボードモデルの開発を行っており、送電用フェーズドアレーアンテナの各素子における位相誤差を測定し、不均一性が送電ビームに与える影響を実験的に検証した。近傍界測定で得られた位相誤差に基づき、各出力に位相を揃えるための補正量を加えることによって位相のバラつきを抑えることができ、またその補正前後で放射パターンを比較したところ、サイドローブの抑制と、ビーム方向精度の目標方向に対する誤差として1.2%の改善が確認できた。また、パワーアンプの移相量の温度依存性や電力付加効率の改善を目的とし、GaNのパワーアンプを試作している。ブレッドボードモデルに実装しているGaAsのパワーアンプと比較して温度依存性は1/3程度、回路の総合効率率は約17%から50%に改善することができることから、小型衛星の増幅部回路への実装を検討している。今後の課題として、モデルの拡張に伴い位相誤差を管理し制御できる送電システムを開発すること、またソフトウェアレトロディレクティブシステムの開発、モデルへの組み込みが挙げられる。

8. 謝辞

本研究では、京都大学生存圏研究所マイクロ波エネルギー伝送実験装置(METLAB)及びJAXA宇宙科学研究所の電波暗室を使用させていただきました。関係の皆様には感謝いたします。

参考文献

- 1) 高橋、田中、牧、川原、佐々木、“SPS 小型衛星用ブレッドボードモデルを用いたソフトウェアレトロディレクティブ方式によるマイクロ波ビーム制御に関する基礎実験”、電子情報通信学会信学技報 WPT2012-08(2012-05)、pp.37-40 (2012)
- 2) 大塚 昌孝、千葉 勇、片木 孝至、鈴木 龍彦、“フェーズドアレーアンテナにおけるモノパルス差パターンのビーム方向に関する検討”、電子情報通信学会論文誌.B,通信 J82-B(3),pp427-434(1999)