

# マイクロ波電力伝送地上実験に向けたビーム方向制御装置の研究

宮川 雄大<sup>†</sup> 谷島 正信<sup>†</sup> 佐々木 進<sup>†</sup> 佐々木 拓郎<sup>‡</sup> 本間 幸洋<sup>‡</sup> 苗村 康次<sup>‡</sup>

<sup>†</sup> 宇宙航空研究開発機構 未踏技術研究センター 高度ミッション研究グループ 〒305-8501 茨城県つくば市千現 2-1-1

<sup>‡</sup> 三菱電機株式会社 通信機製作所 〒661-8661 兵庫県尼崎市塚口本町 8-1-1

E-mail: <sup>†</sup> {miyakawa.takehiro, yajima.masanobu, sasaki.susumu}@jaxa.jp, <sup>‡</sup> {Sasaki.Takuro@dn, Homma.Yukihiro@df, Namura.Koji@da}.Mitsubishi.Electric.co.jp

**あらまし** 宇宙航空研究開発機構と無人宇宙実験システム研究開発機構は 2014 年頃にマイクロ波電力伝送地上実験を行うことを計画している。我々は、マイクロ波電力伝送地上実験の実施に向けて重要な技術であるビーム方向制御技術を担当しており、ビーム方向制御の技術を駆使することで受電部へ向けてマイクロ波ビームを正確に指向制御を行う。この論文ではビーム方向制御評価モデルの機能と特性、ビーム方向制御評価モデルでのビーム方向制御精度の調査結果、およびビーム方向制御装置の評価モデルの部分製作試験の結果について報告する。

**キーワード** 宇宙太陽光発電システム、マイクロ波電力伝送、ビーム方向制御

## Research of the Beam Steering Controllers for the Microwave Power Transmission Ground Experiment

Takehiro MIYAKAWA<sup>†</sup> Masanobu YAJIMA<sup>†</sup> Susumu SASAKI<sup>†</sup>

Takuro SASAKI<sup>‡</sup> Yukihiro Homma<sup>‡</sup> and Koji NAMURA<sup>‡</sup>

<sup>†</sup> Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), Innovative Research Center, Advanced Mission Research Group, 2-1-1 Sengen, Tsukuba City, Ibaraki, 305-8505, Japan

<sup>‡</sup> Mitsubishi Electric Corporation, Communication Systems Center, 8-1-1, Tsukaguchi-Honmachi, Amagasaki City, Hyogo, 661-8661, Japan

E-mail: <sup>†</sup> {miyakawa.takehiro, yajima.masanobu, sasaki.susumu}@jaxa.jp, <sup>‡</sup> {Sasaki.Takuro@dn, Homma.Yukihiro@df, Namura.Koji@da}.Mitsubishi.Electric.co.jp

**Abstract** The Japan Aerospace Exploration Agency and the institute for Unmanned Space Experiment Free Flyer make plans to conduct a Microwave Power Transmission (MPT) ground experiment in fiscal 2014. We handle a beam steering control (BSC) technology which is important among MPT technologies. This paper describes functions and specifications of the BSC Breadboard Models (BBMs), investigation results of the beam pointing accuracy in the BSC BBMs, and results of the manufacturing tests for the BSC BBMs.

**Keyword** Space Solar Power Systems, Microwave Power Transmission, beam steering control

### 1. 導入

宇宙航空研究開発機構(JAXA)は、1998年から宇宙太陽光発電システム(SSPS)の研究を行っている。このシステムを用いて、宇宙太陽エネルギーをマイクロ波もしくはレーザーに変換し、地上に伝送する。静止軌道上で用いることで、衛星に取り付けられた太陽電池パネルで昼夜問わず電力を集めることができる。マイクロ波電力伝送の将来システムとして、巨大な太陽電池で太陽光を集め、GW級の電力を地上に伝送することを計画している。これを達成するためには、kmサイズの送電部が必要になり、送電部を複数枚の送電パネル

で構成する必要がある。

SSPSを実現ために最も重要な技術の一つであるマイクロ波電力伝送技術を得るために、JAXAと無人宇宙実験システム研究開発機構(USEF)では2014年頃にマイクロ波電力伝送地上実験を実施することを予定している。JAXAは三菱電機と協力して、マイクロ波電力伝送の中で重要な技術であるビーム方向制御(BSC)装置を担当している。静止軌道上にあるSSPSは地上にある受電部に向けてマイクロ波ビームを正確に指向させる必要があり、BSC装置はマイクロ波ビーム方向を制御するために重要な役割を果たす。

## 2. マイクロ波電力伝送地上実験

マイクロ波電力伝送地上実験モデル[1]を図1に示す。マイクロ波電力伝送地上実験試験モデルは、送電部、受電部、およびビーム方向制御装置から構成される。送電部は、4枚の送電モジュールから構成され、それぞれの送電モジュールはフェーズドアレーアンテナとパイロット信号受信アンテナを含む。受電部は、レクテナと、モニタアンテナを含むパイロット信号送信アンテナから構成される。BSC装置には、パイロット信号送信部とパイロット信号受信部、およびビーム方向制御部がある。この本装置において、パイロット信号は2.4 GHz帯とし、送電マイクロ波は5.8GHz帯とする予定である。送電マイクロ波が右旋円偏波であるため、パイロット信号の偏波は左旋円偏波とする。送電部側にあるパイロット信号受信アンテナは十字型のモノパルスアンテナとモノパルス給電回路で構成されている。

## 3. ビーム方向制御装置の方式

複数パネルを用いてエネルギー伝送する際、受電電力をできるだけ得るためには、送電モジュールからのマイクロ波ビームを受電部へ向けるだけでなく、受電部で4枚の送電モジュール間のマイクロ波位相誤差を

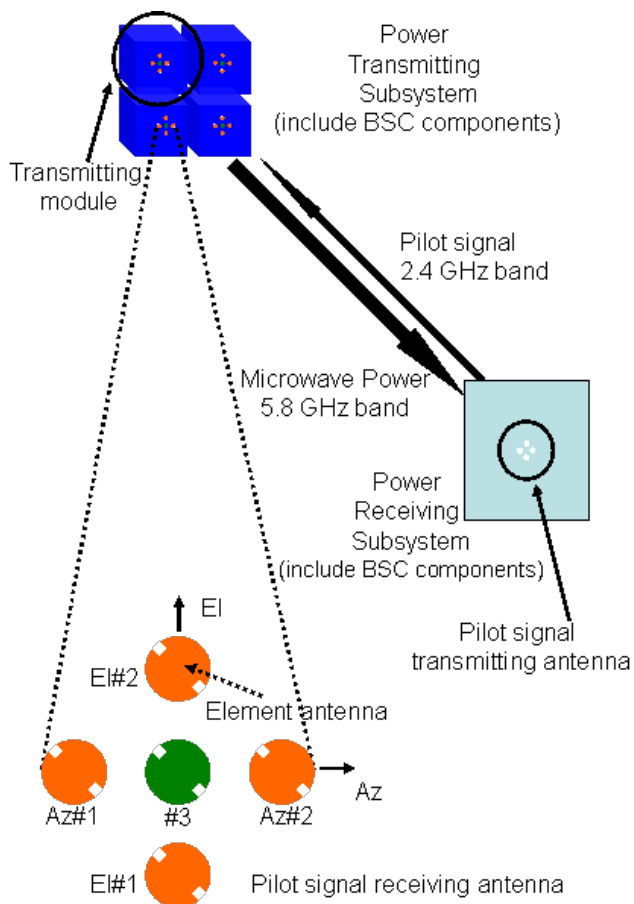
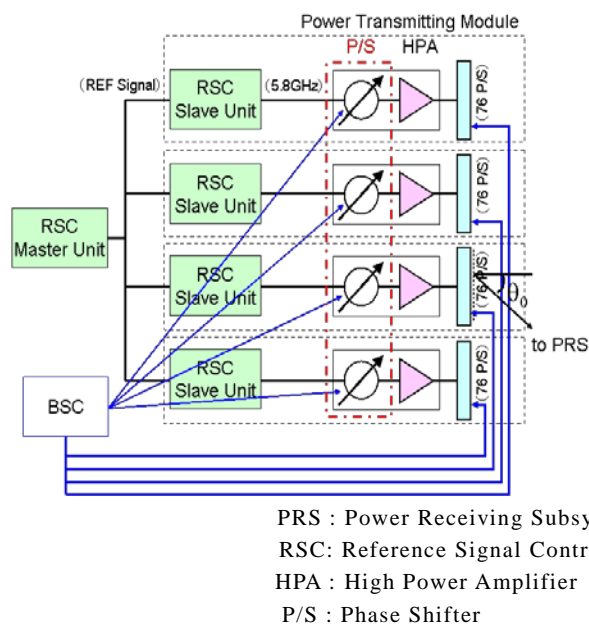


図1: マイクロ波電力伝送地上実験モデル。パイロット信号受信アンテナの中央の素子を和信号、回りの信号を差信号とする。

補正することが必要である。

ビーム方向制御装置のビーム方向制御方式には、モノパルス技術と、素子電界ベクトル回転(REV)法を用いる。モノパルス方式は、2つのアンテナの放射パターンの差を2つのアンテナの放射パターンの和で規格化した信号が角度の関数として表せる特性を用いている[2]。本装置では、モノパルス給電回路の構成を簡易なものにするため、十字形の中央に位置するアンテナ放射パターンで規格化した信号を用いた。水平面内および垂直面内におけるパイロット信号受信アンテナの放射パターンを基にした水平面および垂直面の誤差感度特性から $\pm 10$ 度の範囲でほぼ線形の関係が得られており[1]、地上試験の評価項目の一つであるパイロット信号到来方向の検出機能を検証することが可能である。REV法は、三菱電機が独自に開発した素子電界測定法の1つである[3]。REV法とは、フェーズドアレーアンテナのアレー動作状態において各素子電界の振幅・位相を測定し、その結果を基に各素子が同相合成となるように移相器により位相のキャリブレーションを行う技術である。REV法は、測定対象となる素子の励振位相を0度から360度まで変化させた時のアレーアンテナの合成電力の変化がコサインカーブになることを利用して素子電界の相対振幅、相対位相を測定するものである。

図2に送電部のコンフィギュレーション図を示す。送電モジュールにある高出力増幅器(図2のHPA)の前に置いている移相器(図2のP/S)の位相を順に変化させて4枚の送電モジュールのマイクロ波の振幅を測定することで4枚の送電モジュール間のマイクロ波位相差を得ること及び補正することができる。地上実験では、予めケーブル長に差をつける等して模擬パネル間の



PRS : Power Receiving Subsystem  
RSC: Reference Signal Control  
HPA : High Power Amplifier  
P/S : Phase Shifter

図2: 送電部のコンフィギュレーション図

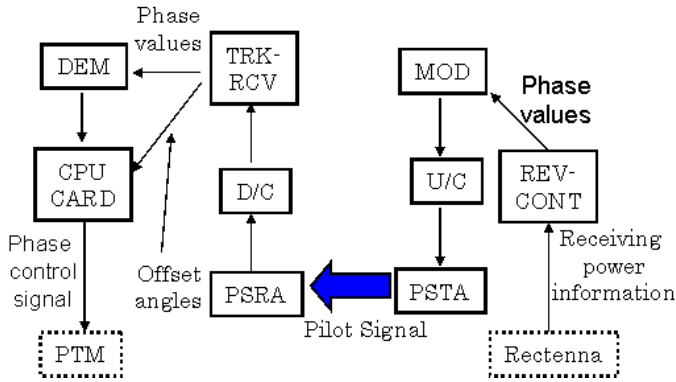


図 3: ビーム方向制御装置のシステムブロック図

位相誤差を設け、REV 法によって補正されることを確認する。

図 3 にビーム方向制御装置のシステムブロック図を示す。ビーム方向制御装置は、送電部が放射するマイクロ波ビームを受電部の方向へ制御する装置である。受電部から送信されるパイロット信号の到来方向に送電部から送電するビーム方向を制御するとともに、受電電力情報を基に受電電力が最大になるように複数の送電モジュール間の位相差を調整する。即ち、REV-Controller がレクテナから受電電力情報を受け取り、パイロット信号送信アンテナが受電電力を最大にするための位相制御情報を送る。パイロット信号受信アンテナにある追尾受信機で、モノパルス追尾信号を受け取ることでパイロット信号の到来方向を推定し、ビーム方向を補正するための指示を送電モジュールに行う。

#### 4. ビーム方向制御評価モデルのビーム方向制御精度

我々は、マイクロ波電力伝送地上実験でのビーム方向制御精度について解析検討を行っている。目標精度について以下のように決定している。2035 年頃に商用システムとしてマイクロ波電力伝送システムを利用するには数  $\text{km}^2$  程度のサイズの受電部を想定している。静止軌道から地球までの距離 36,000 km を考慮して、送電部の開口径を 2 km と仮定するとビーム幅は約 0.0016 度となる。制御精度は、この値の約 10% 以下として、ビーム方向制御精度は商用システムにおいて  $10^{-4}$  度程度が求められる。制御精度が送電アンテナのビーム幅に比例することを考慮して、商用システムおよびマイクロ波電力伝送地上実験での送電アンテナのサイズをそれぞれ直径で 2 km および 1.2 m と仮定すると、マイクロ波電力伝送地上実験において約 0.5 度を達成する必要がある。ここで、我々は地上実験システムに対してビーム方向制御精度を議論することとする。文献[5]によると、指向誤差の 2 乗平均平方根  $\Delta\theta(\text{rms})$  は以下のように与えられる。

$$\Delta\theta = \frac{2\lambda}{(\pi d \cos\theta_0)M^{1.5}} \phi \quad (1)$$

ここで、M はリニアアレーの素子数、 $\phi$  は位相誤差(rms)、 $\lambda$  は波長、d は素子間隔、それから  $\theta_0$  はビーム指向方向である(図 2 を参照)。各送電モジュールを 4 つの送電アンテナ素子を制御する複数のサブアレーで構成している。地上実験システムを考慮してマイクロ波周波数を 5.8 GHz、サブアレー間隔を 1.3 波長、M を 9、 $\cos\theta_0$  を 1、 $\phi$  を 20 度 (rms) と式(1)に代入すると、 $\Delta\theta$  は約 0.36 度(rms) と与えられる。ここで、 $\phi$  の値はワーストケースを想定している。この指向誤差に加えて、1 つの送電モジュールの指向誤差、パイロット信号の到来方向の検出精度、それから環境条件による指向誤差を考慮すると、パイロット信号の到来方向での 1 つの送電モジュールのビーム方向制御精度は約 0.7 度(rms) となる。

次に、受電部の中心方向における 4 枚の送電モジュールのビーム方向制御精度について議論する。送電モジュールによる誤差は式(1)で  $M=18$  とすれば与えられる。この値に加えて、4 つの送電モジュール間の位相設定誤差、およびパイロット信号送信部の受電部への取付け誤差を考慮すると、4 枚の送電モジュールのビーム方向制御精度は約 0.3 度(rms) と与えられる。

#### 5. ビーム方向制御評価モデルの部分製作試験

3 節で述べたビーム方向制御の方法がマイクロ波無線電力伝送地上実験で適用できることを確認するため、我々はビーム方向制御装置の評価モデル[6]の単体製作試験を開始した。

先に、マイクロ波電力伝送地上実験と評価モデルの違いについて述べる。主に(1)送電アンテナ前面に設置したアンテナ素子の数、(2)送電電力、(3)送電距離が挙げられる。

まず、(1)についてだが、地上実験では 1 モジュールにつき 304 素子を用い、サブアレー構成とすることを計画している。一方、評価モデルでは 1 モジュールにつき 4 素子を用い、サブアレー構成としない。次に、(2)については、地上実験では送電電力を 1.6 kW 程度とする予定だが、評価モデルでは 50 W 程度とする予定である。3 つ目に、地上実験では送電距離を約 50 m (屋外での伝送実験) とする予定である。それに対して評価モデルでは電波暗室内で 10 m 程度とする予定である。

このように、コンパクトな評価モデルを用いてビーム方向制御のアルゴリズムを検証すると共に、地上実験に向けたビーム方向制御精度といったシステム性能の割り当てについての妥当性を検証する。

ここでは、評価モデルの主要構成部品であるパイロット信号送信部、パイロット信号受信部、および HPA モジュールの実証試験結果について報告する。まず、これらの機能について説明する。

パイロット信号送信部は、パイロット信号送信アンテナおよびモニターアンテナから構成される。パイロット信号送信アンテナは左旋円偏波でパイロット信号を送信する機能を持つ。モニターアンテナには、右旋円偏波として 5.8 GHz 帯のマイクロ波ビームを受信する機能がある。次にパイロット受信部は、パイロット信号を受信し、モノパルス法で用いる放射パターンとの和信号と差信号を出力する機能を持つ。

HPA モジュールには、マイクロ波電力を増幅する機能を持つ。また、HPA モジュールは 5 ビット移相器を持ち、外部からの制御信号によりマイクロ波の位相を変化させる。

上記の装置に対して実証試験を行った内容について報告する。まず、パイロット信号送電部の仕様と実証試験の結果について表 1 に示す。表 2 と表 3 には変調器、復調器、および HPA モジュールの仕様と結果を表している。表 1~3 を見ると明らかな様に、パイロット信号送信部、および HPA モジュールは仕様を満たしていることが分かる。

我々は、各素子アンテナに対して 90 度回転させるシーケンシャル配置を用いたパイロット信号送

表 1 パイロット信号送信部の仕様と結果

項目	仕様	結果
VSWR	≤ 1.5 at 2.45 GHz ≤ 2.0 at 5.8 GHz	1.07 at 2.45 GHz 1.23 at 5.8 GHz

表 3 HPA モジュールの仕様と結果

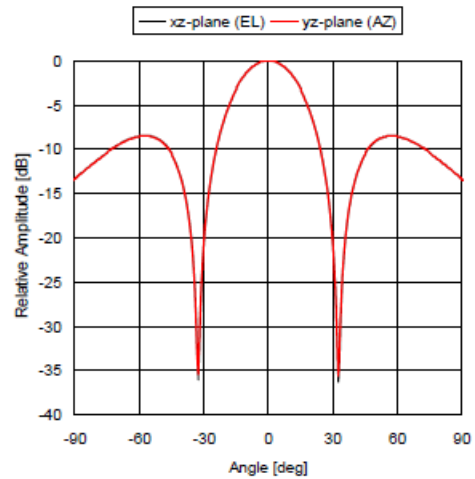
項目	仕様	結果
平均移相量精度	≤ 3 度 rms	≤ 1.5 度 rms
送信尖頭電力	6 ~ 8 W at 5.8 GHz	6.77 ~ 7.72 W at 5.8 GHz
搭載移相器のビット数	5 bit	5 bit

表 4 パイロット信号送信アンテナの軸比パターンの計算結果と測定結果

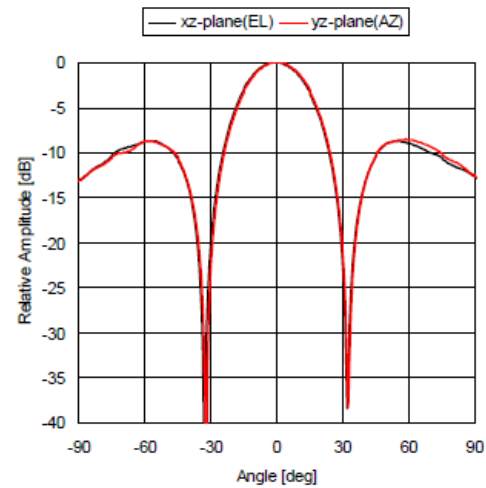
項目	計算結果	測定結果
正面方向	0.04 dB	0.41 dB
±5 度	≤ 0.07 dB	≤ 0.46 dB
±10 度	≤ 0.24 dB	≤ 0.59 dB

表 5 モニターアンテナの軸比パターンの計算結果と測定結果

項目	計算結果	測定結果
正面方向	0.54 dB	1.43 dB
±5 度	≤ 1.09 dB	≤ 2.24 dB
±10 度	≤ 2.24 dB	≤ 3.23 dB



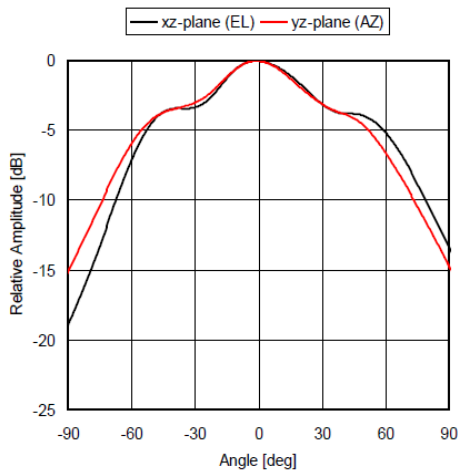
(a) 計算結果



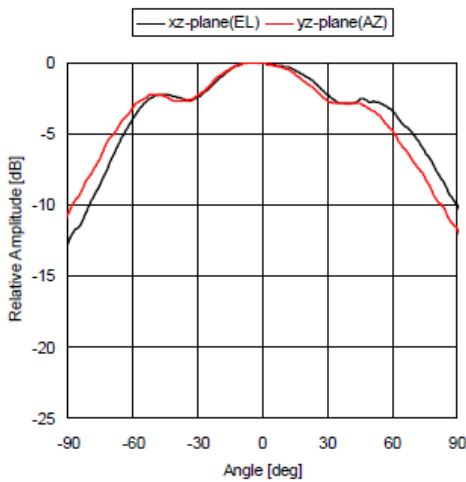
(b) 測定結果

図 4 パイロット信号送信アンテナの放射パターンの結果

信アンテナを構成した。表 4 は、パイロット信号送信アンテナの軸比パターン計算結果と測定結果を示す。これより、軸比特性は正面方向で 0.41 dB と良好であることが分かる。ビーム方向制御精度確実にするには受電部の中心にパイロット信号送信アンテナとモニターアンテナの両方を設置する必要がある。従って、パイロット信号送信アンテナをアレーアンテナとして構成し、パイロット信号送信アンテナの中心にモニターアンテナを設置することで、モニターアンテナの中心位置をパイロット信号送信アンテナの中心位置に一致させた。仮にモニターアンテナをアレーアンテナとして使用すると、素子間隔が狭くなり、結果として特性を低下させる危険性がある。図 4 はパイロット信号送信アンテナの放射パターンの計算結果および測定結果を表している。図 5 は、モニターアンテナの放射パターンの

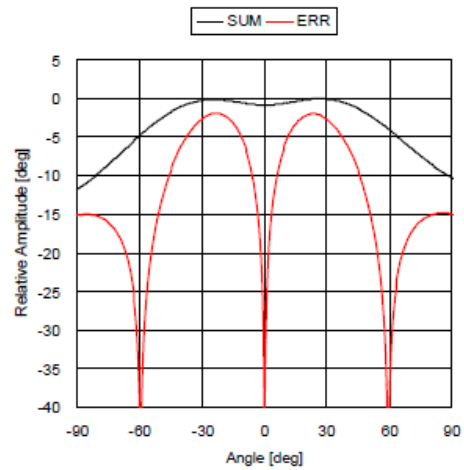


(a) 計算結果

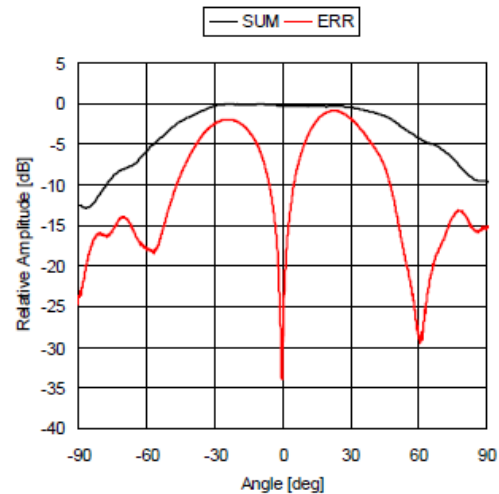


(b) 測定結果

図5 モニターアンテナの放射パターンの結果

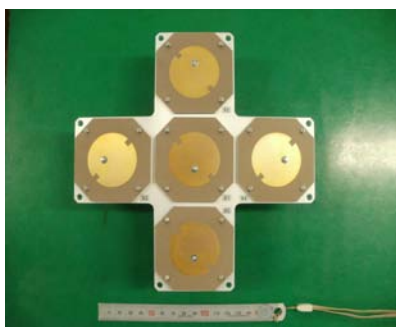


(a) 計算結果

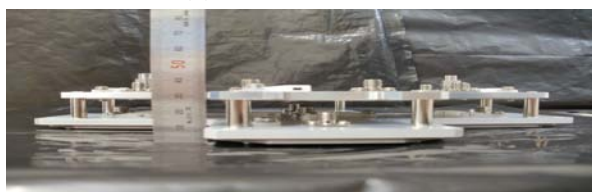


(b) 測定結果

図7: 方位角方向のパイロット信号受信アンテナの放射パターンの結果



(a) 正面図



(b) 側面図

図6 パイロット信号受信アンテナ

計算結果と測定結果を表している。既に述べた様に、モニターアンテナの周りにパイロット信号送信アンテナが取り付けられている。その結果、それらの放射パターンと軸比が両者の位置関係によって影響を受ける。しかし、その関係はマイクロ波電力をモニターする用途にほとんど影響を与えない。それから、表5はモニターアンテナの軸比パターンの計算結果と測定結果を表している。これらの結果は、アンテナの性能として問題がないことを意味している。

次に、我々はパイロット信号受信アンテナについて述べる。2次元のモノパルス法を実現するために、和信号を生成するための素子アンテナが中央にあり、その周りには、方位角方向と仰角方向にそれぞれ2つずつアンテナがある。薄型化させるためには、モノパルスアンテナとモノパルス給電回路を接続するコネクタの高さを低くすることが重要である。

それ故、我々は細線同軸線路-SMA変換コネクタを

## 6. まとめ

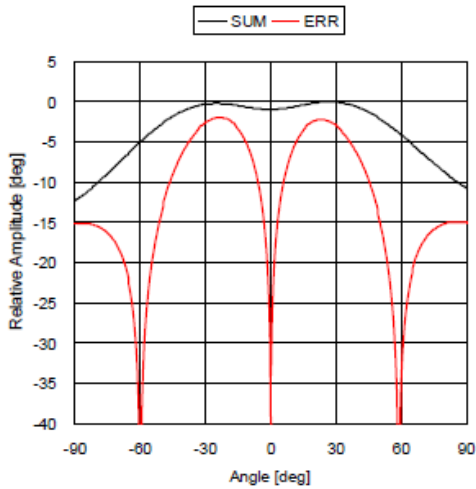
我々は、BSCの機能と仕様、マイクロ波電力伝送地上実験におけるビーム方向制御精度の設計検討、および評価モデルの部分試作試験の結果について報告した。商用SSPSシステムにて要求されているビーム方向制御精度を考慮すると、地上実験システムにてビーム方向制御精度0.5度以下を達成する必要がある。主な指向誤差要因を二乗平均平方根で評価したところ、地上実験システムでのビーム方向制御精度は約0.3度(rms)であることが分かった。また、我々は、パイロット信号送信部、パイロット信号受信部、およびHPAモジュールについて試験を行い、それらの全てが仕様を満たしていることを確認した。良好な軸比特性を得るために、我々は、各素子アンテナに対して90度回転させるシーケンシャル配置を用いたパイロット信号送信アンテナを構成した。

結果として、軸比特性は正面方向で0.41 dBと良好であることが分かった。パイロット信号受信アンテナを薄型化させるために、我々は細線同軸線路-SMA変換コネクタを採用した。これにより、パイロット信号受信アンテナの厚み46.1 mmを達成した。

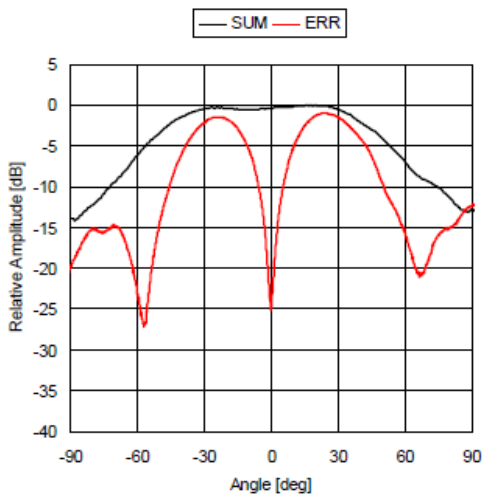
今後は、パイロット信号受信アンテナにおいて細線線路-SMA変換コネクタの代わりに基板実装型レセプタクルを用いて更なる薄型化を図る。また、これ迄に製作していない評価モデルの製作試験を実施する予定である。

## 文 献

- [1] T. Miyakawa, M. Yajima, Y. Fukumuro, S. Sasaki, T. Sasaki, Y. Homma, and K. Namura, Development status of the Beam Steering Control Subsystem for the Microwave Power Transmission Ground Experiment, IEEE MTT-S IMWS on Innovative Wireless Power Transmission, pp.231-234, May 2011
- [2] 吉田孝, レーダ技術, 電気情報通信学会, p275-279, 1984年
- [3] 真野清司, 片木孝至, “フェイズドアレーアンテナの素子振幅位相測定法—素子電界ベクトル回転法—”, 電子通信学会論文誌, vol.J65-B, no. 5, pp. 555-560, 3月 1982年
- [4] T. Takahashi, Y. Konishi, S. Makino, H. Ohmine, and H. Nakaguro, Fast Measurement Technique for Phased Array Calibration, IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 56, pp.1888-1899, July 2008.
- [5] 大塚昌孝, 千葉勇, 片木孝至, 鈴木龍彦, “フェイ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, Vol. J82-B, No. 3, pp.427-434, 3月 1999年
- [6] T. Miyakawa, M. Yajima, Y. Fukumuro, S. Sasaki, T. Sasaki, Y. Homma, and K. Namura, Research of the Beam Steering Control Subsystem for the Microwave Wireless Power Transmission Ground Experiment, The 28<sup>th</sup> International Symposium on Space Technology and Science, 2011-q-17, pp.1-6, June 2011



(a) 計算結果



(b) 測定結果

図 8: 仰角方向のパイロット信号受信アンテナの放射パターンの結果

採用した。これにより、パイロット信号受信アンテナの厚みを当初 60 mm で考えていたのに対して 46.1 mm の厚みを達成した。その結果、図 6 の (b) のように薄型化にすることができた。図 7 は、方位角方向のパイロット信号受信アンテナの放射パターンの計算結果および測定結果を表し、仰角方向については図 8 に示す。我々は、和パターンのピーク値が 0 dB になるように相対振幅を規格化した。図 7 と図 8 を見ると分かる様に、振幅モノパルスの引き込み範囲が  $\pm 24$  度で得られており、計算結果とも一致する。よって、これらの結果を評価モデル及びマイクロ波電力伝送地上実験システムに適用することができる。