

マイクロ波無線電力伝送地上試験システム用ビーム方向制御装置の開発[†]

Development of Microwave Beam-pointing Controller for Wireless Power Transmission Ground Test

牧野克省^{*1‡}・上土井大助^{*1}・中台光洋^{*1}・谷島正信^{*1}・大橋一夫^{*1}
高橋智宏^{*2}・佐々木拓郎^{*2}・本間幸洋^{*2}
Katsumi Makino^{*1}, Daisuke Joudoi^{*1}, Mitsuhiro Nakadai^{*1}, Masanobu Yajima^{*1}, Kazuo Ohashi^{*1},
Tomohiro Takahashi^{*2}, Takuro Sasaki^{*2} and Yukihiro Homma^{*2}

マイクロ波無線電力伝送地上試験システム用ビーム方向制御装置を開発し、軌道上の大規模 SSPS (Space Solar Power Systems) における太陽熱や重力傾斜トルクによる巨大アンテナ面の変形を模擬した状態で、その変形を電子的に補正し、5.8GHz 帯の kW 級高出力マイクロ波ビームを所望の方向に高精度で指向制御できることを実測により確認し、ビーム方向制御方式の有効性を実証した。また、無線電力伝送した電力を実負荷に供給して、ユーザに実際に使用していただく実用化実証(デモンストラレーション)を実施した。

JAXA developed the high-accuracy microwave beam-pointing controller for the wireless power transmission ground test, and demonstrated the efficacy of a beam-pointing control technique. The demonstration was made with kW-class high-power 5.8GHz band microwave-power transmission. The demonstration was also designed to simulate a deformation of the huge power transmitting antenna panel that is a part of SSPS(Space Solar Power Systems) by thermal distortion and gravity gradient torque in space. Therefore, this beam-pointing control technique has potential for applying to SSPS. Another wireless power transmission test was performed outdoors to demonstrate microwave wireless power transmission over a distance of about 55 meters, and the receiving power was supplied to its user actually.

Keywords : Space Solar Power Systems, Microwave Beam-pointing Control, Wireless Power Transmission

1. はじめに

宇宙太陽光発電システム (Space Solar Power Systems: SSPS) の実現にはマイクロ波による無線電力伝送技術が必須であり、その中枢となる技術が「高精度マイクロ波ビーム方向制御技術」である。高精度マイクロ波ビーム方向制御技術の獲得に向けて、JAXA は、経済産業省から委託を受けた一般財団法人宇宙システム開発利用推進機構(以下、「J-spacesystems」)との連携協力の下、「マイクロ波無線電力伝送地上実証試験」を平成 26 年度に実施した。この地上実証試験の目標は「伝送距離 10m 以上でビーム方向制御精度 0.5 度 rms 以下を達成すること」である。JAXA は、マイクロ波無線電力伝送地上試験システムのうち、ビーム方向制御部の開発を担当した。本稿では、「マイクロ波無線電力伝送地上実証試験」の結果について述べる。

2. マイクロ波ビーム方向制御方式

マイクロ波方式 SSPS の送電用アンテナパネルは、サイズにして km 級となる。これ程の巨大なアンテナ構造面は、太陽熱による歪みや重力傾斜トルクにより、必要なアンテナ面精度を維持することは難しく、変形は避けられない。そのため、送電アンテナから放射されるマイクロ波ビームの方向を極めて正確に地上の受電サイトへ向けるよう制御する際には、各送電アンテナモジュール間の構造的な位置ずれや角度ずれを電子的に補正する必要がある。そこで、これらを考慮したマイクロ波ビームの方向制御方式として、パイロット信号の到来方向検知に「振幅モノパルス法¹⁾」、複数の送電アンテナモジュール間における位置ずれ及び角度ずれを補正する手段として「素子電界ベクトル回転法²⁾ (Rotaing-element Electric-field Vector Method : REV 法)」を用い、これらを組み合わせた独自の制御方式を開発した。REV 制御では、各送電パネルの初段高出力増幅器前段にある移相器の位相を 0 度から 360 度変化させ、合成電界が余弦的に変化することを利用して送電パネル間の相対的位置関係を位相差として検知し、その位相差が零となるよう位相指令を移相器に設定することで、構造的な位置ずれや角度ずれを電子的に補正する。

マイクロ波無線電力伝送地上試験システムは、送電部、受電部及びビーム制御部(ビーム方向制御装置)から構成さ

[†] 宇宙・航行エレクトロニクス研究会 (SANE), 2015 年 6 月 18 日,筑波にて発表
第 1 回宇宙太陽発電シンポジウム, 2015 年 12 月 16 日, 東京にて発表

[‡] Corresponding author: Katsumi Makino, E-mail: makino.katsumi@jaxa.jp

^{*1} 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構 研究開発部門
〒305-8505 茨城県つくば市千現 2-1-1
Japan Aerospace Exploration Agency,
2-1-1 Sengen, Tsukuba City, Ibaraki 305-8505, Japan

^{*2} 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
Mitsubishi Electric Corporation, 8-1-1 Tsukaguchi-Honmachi,
Amagasaki City, Hyogo 661-8661, Japan

れる。送電部側は SSPS の宇宙セグメントに相当し、受電部側は地上セグメントに相当する。送電部は 4 枚の送電パネルから構成され、送電パネル 1 枚あたりのサイズは 0.6m×0.6m、アンテナ素子数は 304 素子(76 サブアレイ)である。ビーム方向制御装置は、送電部側装置及び受電部側装置から構成され、①受電部から送電部に向けて、高出力マイクロ波のビーム方向を指示するパイロット信号(2.45GHz 帯)を送り、②振幅モノパルス方式により、パイロット信号到来方向をパイロット信号受信アンテナにて検出、③当該方向に高出力マイクロ波(5.8GHz 帯)をビームとして打ち返すよう各送電アンテナの移相器に必要な指示を出す。大規模 SSPS における送電アンテナ面の構造上の変形量に関するシステム要求として 40mm の段差や±5 度の傾きが最大許容値として示されており³⁾⁴⁾、本試験システムの送電部における 4 枚の送電アンテナパネルは、これらの変形が模擬できるよう、面と面の段差(±20mm)や角度ずれ(±5 度)の変形設定が可能である。

3. ビーム方向制御精度評価試験（屋内試験）

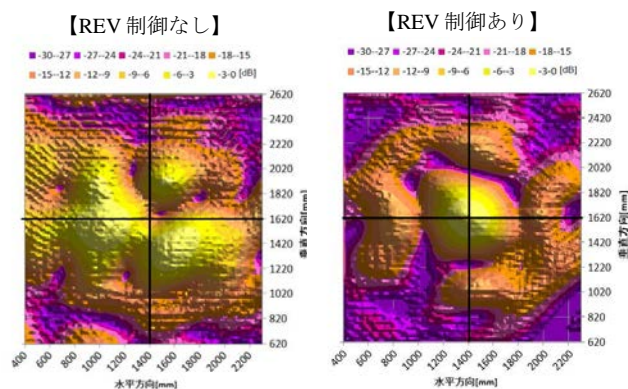
国内で唯一、高出力マイクロ波を用いた応用実験が実施可能な京都大学宇治キャンパスにある電波暗室(A-METLAB)において、軌道上における送電アンテナ面の変形を送電部にて模擬し、この状態でビーム方向制御装置の REV 制御機能により要求されているビーム方向精度が確保できるか検証した。その結果、ビーム方向制御精度は 0.15 度 rms であることを確認⁵⁾し、目標を達成した。また、REV 制御の有無によるビーム形状の補正効果の一例⁵⁾を第 1 図に示す。REV 制御により各送電パネルの励振位相を補正し、結果としてビームポインティングが正しく行われていることが確認できる。

4. 屋外でのマイクロ波による無線電力伝送

屋内(電波暗室)でのビーム方向制御精度評価試験において目標精度を達成したことから、伝送距離 50m 以上の屋外での無線電力伝送を試みた。ガイドビームであるパイロット信号のマルチパス対策を講じたものの、その影響が大きく、振幅モノパルス法によるパイロット信号到来方向検知は見送り、送電パネルと受電パネルを正対させた上で、送電パネル上 2 枚と下 2 枚で段差を与え、このような送電アンテナ面の変形状態で、無線送電を行った。REV 制御により送電アンテナ面の変形の無い基準状態と同様、受電部にて約 330~340W の電力が取り出せることを確認⁵⁾し、REV 制御の有効性を実証した(第 1 表参照)。

5. 無線電力伝送の実用化に向けた技術実証(デモ)

平成 27 年 3 月 8 日、J-spacesystems との連携協力の下、赤穂アマチュア無線クラブの協力を得て、無線で伝送した電力を用いてアマチュア無線局の運用を実施した。無線送電した電力を実負荷(ユーザ)に実際に供給した伝送試験は日本初である。送電側装置から約 55m 離れた受電側装置に向けて約 1.8kW の高出力マイクロ波を放射、それを受電側装置において約 320~340W の電力に変換し、アマチュア無線の交信に電源供給した。アマチュア無線局は 1 局を運用、交信局数(7MHz 帯)はリハーサル時を含め 283 局に及び、無線送電の有効性を効果的にアピールすることができた。



第 1 図 REV 制御によるビームの補正効果(一例)

第 1 表 REV 制御による受電電力の改善

No.	送電アンテナの変形設定	REV制御	受電電力(総和)	モニタアンテナ(*)の受信レベル	備考
1	なし(基準状態)	ON	341 W	0.0 dB	—
2-1	上下段差(20mm)	OFF	152 W	-5.9 dB	下側2枚の送電アンテナを基準位置より+20mm
2-2		ON	332 W	0.0 dB	
3-1	上下段差(40mm)	OFF	211 W	-2.7 dB	・上側2枚の送電アンテナを基準位置より-20mm ・下側2枚の送電アンテナを基準位置より+20mm
3-2		ON	339 W	0.0 dB	

*モニタアンテナ: 受電部中央に設置された 5.8GHz 帯送電ビームの強度を測定するアンテナ

6. まとめ

高精度のマイクロ波ビーム方向制御装置を開発し、SSPS の巨大送電アンテナ面の変形を模擬した状態で、その変形を電子的に補正し、高出力マイクロ波ビームを所望の方向に高精度(0.15 度 rms)で指向制御できることを実測により確認、ビーム方向制御方式の有効性を実証した。また、無線電力伝送した電力を実負荷に供給し、ユーザに実際に使用していただく実用化実証(デモ)を日本で初めて実施した。

謝辞

本研究開発を進めるにあたり、多大なご協力、ご支援を頂きました。J-spacesystems、京都大学、赤穂アマチュア無線クラブの関係者の皆様方に深く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 大塚昌孝, 千葉勇, 片木孝至, 鈴木龍彦: フェーズドアレイ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, **J82-B** (1999), pp. 427-434.
- 2) 真野清司, 片木孝至: フェーズドアレイ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, **J65-B** (1982), pp. 555-560.
- 3) 財団法人無人宇宙実験システム研究開発機構, 平成 18 年度太陽光発電利用促進技術調査 成果報告書 別冊 システム専門委員会報告書 (2007), p. 22.
- 4) 財団法人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 別冊 送電技術専門委員会報告書, (2008), p. 3.
- 5) 牧野克省, 上土井大助, 中台光洋, 谷島正信, 大橋一夫, 高橋智宏, 佐々木拓郎, 本間幸洋: SSPS の実現に向けた高精度マイクロ波ビーム方向制御装置の開発とその技術実証試験, 電子情報通信学会技報, SANE 2015-22 (2015), pp. 37-42.

(2016.2.5 受付)