

# Issues on Wireless Power Transmission for Space Solar Power Systems<sup>1</sup>

Kozo Hashimoto (Professor Emeritus, Kyoto University)

## Abstract

Several issues to be attained before realization of space solar power systems are discussed.

1. Although recent microwave power amplifiers show very good efficiencies, those of their modules or arrays are not so good.
2. Although efficiencies of rectennas are good, their harmonics radiation must be suppressed. Both qualities must be revised simultaneously for the realization.
3. In order to suppress harmonics radiation from SSPS, efficiencies of antenna array for the harmonics must be low. This is generally difficult for phase shifters based on the tapped delay line since this system has good efficiencies for the harmonics. Other phase shifters must be developed.
4. Retrodirective systems which respond to sine waves are not safe. Some schemes must be developed in order to avoid this problem.
5. SSPS can send power to multiple directions.

---

<sup>1</sup> Presented at the Seventeenth SPS Symposium, 21-22 October, 2014

# 宇宙太陽発電における無線電力伝送の課題\*

○橋本弘藏(京都大学名誉教授)

## 1. はじめに

宇宙太陽発電の実用化までには達成しておくべき課題として気づいた点をまとめてみた。今後の課題として、順次達成して行かれることを期待している。

## 2. 高周波増幅器, アレイアンテナ

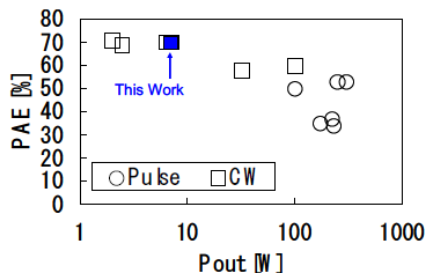


図1 高周波出力増幅器の効率[1]

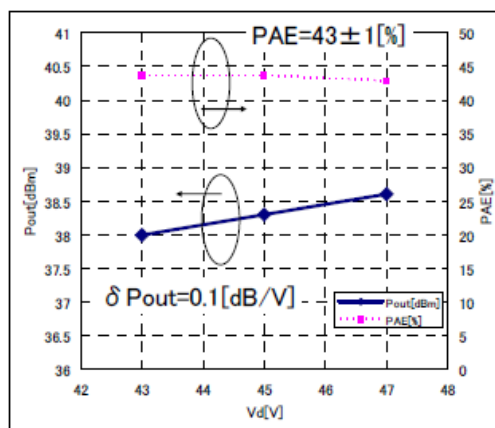


図2 高周波出力モジュールの効率[1]

マイクロ波帯高周波出力増幅器の高効率化は進んでいる。図1に5.8GHz帯 GaN HEMTの高周波出力増幅器単体の下式で表される電力付加効率 (PAE) の例を示すが、出力7.3Wで70%以上の高効率となっている[1]。不要放射も-60dBc以下と少ない。

$$\text{PAE (\%)} = \frac{\text{Power (RF\_out)} - \text{Power (RF\_in)}}{\text{Power\_dc}} * 100\%$$

複数の増幅器をまとめて使うためには、これに整合器、サーキュレータ、ドライバーアンプ等を含めたモジュール化が必要となる。しかし、最適化したモジュールのPAEは図2に示す様に、43%に低下してしまう。この例は、地上でのマイクロ波伝送実験に向けて開発されてきたもので、目標を超えた単体性能となっている。しかしながら、システムとしての総合効率は、本例のように低下してしまうのが、一般的である。将来のSSPSでは、送

\*第17回SPSシンポジウム, 2014年10月21-22日に発表

電システムの効率が 80%以上となることが望ましい[2]。素子単体の効率は達成可能であるが、システムとしての効率を上げていく工夫、努力に期待したい。

### 3. レクテナ効率と高調波放射

レクテナも SSPS 向きの低電力で高効率のものが開発されてきているが、SSPS 実現時を考えた場合、レクテナからの高調波再放射が問題となる[3,4]。受電点近傍に与える干渉や、宇宙に向かって再放射される強度が問題となる。

これに対し、5 素子のレクテナの給電位相をランダムにする方法がある。レクテナでは、基本波は位相に関係なく受電できるのに対し、高調波の位相がランダムなので、放射を抑えることができる[5]。100 素子の場合の効果もシミュレーションにより計算されている。

レクテナに高調波フィルタを入れ、基本波のみとなった反射波をスタブで整合をとることにより、反射の抑制を行う方法もある[6]。低電力(0.25W)のために効率が 56.6%にとどまったとされているが、反射電力は、その 50 分の 1 程度になっている。

これらの方式を含め、更なる効率向上と反射抑制や多素子での実証に期待したい。

### 4. アレイアンテナの高調波利得

例えば、宇宙—地上間通信は 10.7~11.7GHz 及び 11.7~12.5GHz であり、2.45GHz 帯の第 5 次高調波(12-12.5GHz)及び 5.8GHz 帯の第 2 次高調波(11.45-11.75GHz)の 11.7-11.75GHz が日本の BS, CS と重複している。宇宙—地上間通信のコンパチビリティ条件(pfd 制限値)は表 1 の通りである。

表 1 宇宙—地上間通信のコンパチビリティ条件 (dBW/m<sup>2</sup>/4kHz)

| 到達角 d                     | 0-5° | 5-25°         | 25-90° |
|---------------------------|------|---------------|--------|
| 10.7~11.7GHz              | -150 | -150+0.5(d-5) | -140   |
| 11.7~12.5GHz (日本の BS, CS) | -148 | -148+0.5(d-5) | -138   |

2.45GHz の第 5 次高調波の放射レベルを-70dBc とする。高調波に対して無指向性のアンテナであるとする、-157 (dBW/m<sup>2</sup>/4kHz)となり、pfd 制限値以下とすることができる。5.8GHz の第 2 次高調波は、仮に位相制御が行なわれたとするとビーム中心で-42.2 (dBW/m<sup>2</sup>/4kHz)、0.016 度ビームを振った場合の第 1 グレーティングローブは-59.2 (dBW/m<sup>2</sup>/4kHz)となる。位相がランダムとなり、無指向性アンテナの場合と同様の放射となった場合は-155(dBW/m<sup>2</sup>/4kHz)となり、pfd 制限値以下となる。高調波の位相をランダムとできれば十分共存可能であると考えられる。

問題は、広く使われている伝送線路の長さを変える方式の移相器は、基本派の n 倍の高

調波に対する移相量は、基本派の  $n$  倍となり、ある方向にビームが向いてしまい、位相はランダムにならない。移相器に何らかの工夫がなされることが必要である。

## 5. レトロディレクティブシステム精度、安全性

レトロディレクティブシステムは、地上の受電点から送られるパイロット信号の到来方向に正確に電波を送るものである。通信用途の小型アレイの場合には、ハードウェアで実現されることが多いようであるが、SSPS のように大規模な場合は、到来方向を測定し、その方向にアレーアンテナのビームを形成するソフトウェア方式が多い。測定アンテナの間隔を広げるほど精度は上がるが、位相差が 360 度を超えるため、あいまいさが生じる。したがって大規模になるとアンテナ間隔が増えるので、精度も良くなる。必要な精度が得られる複数の間隔で測定し、それらの間隔やその数を工夫することにより、必要な精度は得られると期待している。

レトロディレクティブシステムは、原理的には正弦波の到来方向にビームを向けるものであるが、目的外の方向からの電波に反応することは、望ましくなく、危険な場合もある。そのためには、スペクトル拡散したパイロット信号を用いる[7]など、正弦波に対応しない対策が必要となる。スペクトル拡散を用いる方式は、同一周波数でも、特定の信号を識別でき、妨害波や干渉に強い。この場合でも無変調の場合と同様の精度を得ることができている。意図的な盗電などを強力に防ぐためには、さらに認証用の暗号による変調が必要となる。

## 6. 複数方向送電

送電電力に余裕がある場合には、複数方向に電力を送ることができる。複数の受電局からパイロット信号は送られることになるが、前述のスペクトル拡散が有効である。同じ拡散符号でもタイミングが異なれば識別可能であるので、一つの符号に対応しておけば良い。電力を分割するには、時分割による方法と、複数ビームを形成する方法がある。

### 6.1 時分割法

メインビームの方向を時間的に切り替える方式で、時間比で分割比が決まる。受電電力がオンオフされるので、レクテナ側で直流にするための時定数や切り替え周波数により、得られる電力が変化するので、最適化を検討する必要がある。

### 6.2 マルチビーム法

マルチビームはアッテネータと移相器を組み合わせることで容易に作ることができ、通信分野ではよく使われている。しかし、効率を重視する電力伝送では、等振幅励振とし、移相器だけで構成することが望ましい。詳細は文献に譲るとして、図に 2 方向送電モデルにおいて、第一サイドローブを抑制した通常のビーム形成の場合を黒で、抑制せずに主ビームの幅を広げた得られた結果を青で示す。この図から分かるように第一サイド

ローブを抑制しない方が、サイドローブの最大値 (MSLL) が全体的に減少していることがわかる。それぞれの所望方向における電力収集効率と、一方向で受電可能な電力効率 (90.6%) に対する比を表に示す。

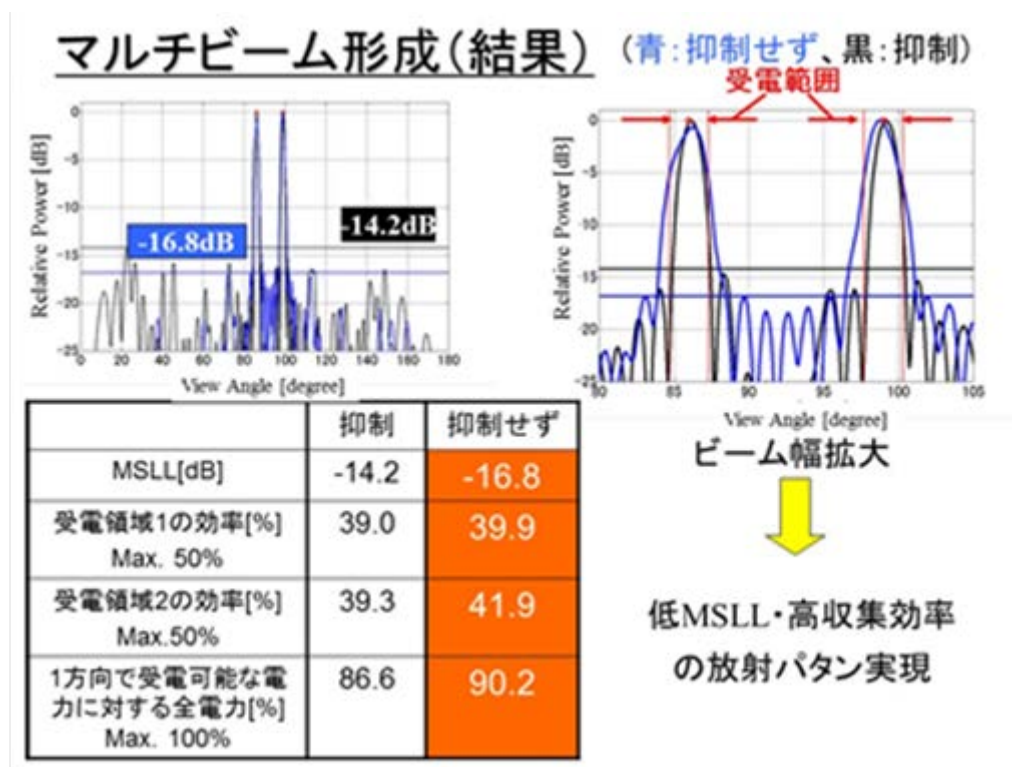


図3 等振幅励振でのマルチビーム形成

## 7. まとめ

無線電力伝送に関する今後の課題について述べてきた。今回の発表に続く講演[4]では、長時間かかっていたビーム形成を短時間で行う方法の発表があった。現時点では効率が良くないようであるが、期待すべき試みである。今回の指摘に限らず、様々な課題に挑戦し、SSPSの実現に近づいていくことを期待している。

## 参考文献

[1] Y. Tsuyama, K. Yamanaka, K. Namura, S. Chaki, and N. Shinohara, Internally-matched GaN HEMT High Efficiency Power Amplifier for SPS, IWPT2-4, 2011 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Innovative Wireless Power Transmission, Uji, Kyoto, Japan May 12-13, 2011.

[2] 中村、斉藤、佐藤、三原、伊地智, 地上無線送電実験-位置づけと今後の展望, SPS シ

ンポジウム, Oct. 3, 2013

- [3] 藤野, 藤田, マイクロ波受電用レクテナの高調波再放射の評価に関する実験的研究, 電気学会論文誌 A, **117-A**, 490-495, 1997
- [4] 藤野, 藤田, 平面形状を有するレクテナの高調波再放射の測定法とその評価, 電子情報通信学会論文誌 B-II, **J81-B-II**, 112-118, 1998
- [5] 鈴木, 藤野, 古川, 藤原, 高橋, 宇宙太陽発電衛星システム用高調波抑制型レクテナアレーの基礎研究, 電子情報通信学会技術研究報告, SPS2006-4, 2006
- [6] 林野, 久米, 福居, 岩崎, 敖, 大野, 高調波遮断フィルタを用いた GaN SBD レクテナ回路, 電子情報通信学会技術研究報告, WPT2012-53, 2012
- [7] Hashimoto, K., K. Tsutsumi, H. Matsumoto, and N. Shinohara, Space Solar Power System Beam Control with Spread-Spectrum Pilot Signals, The Radio Science Bulletin, 311, 31-37, 2004.
- [8] 橋本, 新島, 江口, 松本, マイクロ波送電用均一振幅フェーズドアレーのビーム最適化, 電子情報通信学会技術研究報告, SPS2005-09, 2005
- [9] 吉野純樹, 篠原真毅, 三谷友彦, フェーズドアレーアンテナの位相制御によるサイドローブ低減の研究, Oct. 22, 2014