

Electron Tube Devices for Solar Power Satellite Systems

Koji Tanaka

Space Power Systems, Research Division for Space Applications

The Institute of Space and Astronautical Science (ISAS)

(E-mail:ktanaka@newslan.isas.ac.jp)

FAX:+81-427-59-8464

Electron tube devices such as a magnetron and klystron were adopted for the microwave power transmitter in the early concepts of the solar power satellite (SPS) systems. However, solid-state devices become popular in the recent SPS studies. Electron tube devices still have some advantages as follows.

- Easier thermal control,
- High conversion efficiency,
- High power generation/amplification per one device,
- High voltage operation.

In this paper, various types of the microwave tubes that are the candidates for the SPS systems are briefly described and compared with the solid-state devices.

大電力マイクロ波送電における電子管デバイスの可能性と課題

田中 孝治

宇宙科学研究所 衛星応用工学研究系 宇宙エネルギー工学部門

(E-mail:ktanaka@newsian.isas.ac.jp)

FAX:042-759-8464

1.はじめに

太陽発電衛星(SPS)システムのマイクロ波送電素子として、NASAのリファレンスシステムではクライストロンやマグネトロンなどの電子管が検討されたが、現在の多くのSPSモデルでは80年代以降大きな進歩を遂げた固体素子マイクロ波デバイスが主流となっている。しかし、電子管デバイスには、熱的特性に優れ、単管出力が大きく、効率も高く、高電圧駆動が可能であるという優れた特徴があり、大電力マイクロ波送電システムにおけるDC-RF、増幅あるいはRF-DC変換素子としていぜん有望である。以下、SPSシステムで採用される可能性のある電子管デバイスに関して簡単に述べ、固体素子との比較を行う。

2.電子管マイクロ波デバイス

現在、マイクロ波帯からミリ波帯にわたり種々の電子管デバイスが実用化され、またさらに高性能化のための開発研究が行われている。SPSシステムにおいては、マイクロ波を用いて、大気を通して地上にエネルギーを送電するために減衰の少ない、いわゆる電波の窓といわれる1~10GHz程度の周波数の利用が考えられる。実際に多くのSPSシステムでは2.4-2.5GHzのISM(Industrial, Science, Medical)バンドが想定されている。このような周波数帯域で現在よく利用されている電子管デバイスには、広い意味での遅波管に分類されるマグネトロン、クライストロン、進行波管(TWT)等がある[1]。これらは、1930年代半ばから1940年代にかけて発明され、機構的な改良、電子ビームを発生するためのより動作温度の低い熱陰極の開発、軽量で磁場強度の強い永久磁石の採用等により、現在ではこれら電子管の性能、信頼性は格段に向上し、長寿命化が達成されている。

遅波管の特徴は電子ビームと電磁波の相互作用領域に電磁波の位相速度が自由空間における光速よりも遅くなる遅波構造を用いる点にある。したがって、電子ビームの速度と電磁波の位相速度をほぼ等しくすることが可能であり、電子ビームと電磁波の間で相互作用が生じる。マグネトロンは交差電磁界形電子管の一種であり、高効率高出力であることからレーダー用送信管や加熱用発振管として広く利用され、家庭用電子管として用いられている唯一のマイクロ波電子管である。NASAのリファレンスシステムでもマグネトロンコンセプトとしてまとめられている[2],[3]。クライストロンもまた、リファレンスシステムの候補システムにおけるマイクロ波デバイスとしてとり上げられている[2],[3]。約4GHzで700kW以上と大きな出力が得られるが、500MHzから6GHz程度までのものが多い。進行波管もクライストロンと同様な直線型電子管であり、広帯域の増幅器として実用化されている。動作周波数は100GHz程度に及ぶ。近年、テーパ型遅波構造や多段減速コレクターを用いたエネルギー回収によって効率が改善され、Kuバンドで出力100W、効率60%以上の宇宙用TWTが開発されている。また、最近注目されている技術として、固体素子と進行波管増幅器(TWTA)を組み合わせたMPM(Microwave Power Module)があり、重量、体積が各段に向上した。また、従来のTWTAの寿命は15年程度であるが、MPMではTWTAを低い増幅率で使用することでデバイスの寿命が20年程度となっている。次節において、固体素子との比較を示す。

3.電子管デバイスと固体素子との比較

固体素子と電子管を比較した場合、電子管は高電圧駆動が可能であるため、地上の電力システムの場合と同様に配線重量を小さくすることができ、またDC-DCコンバーターを必要としないシステムの実現の可能性がある。電子管の動作特性は原理的にはデバイスの温度に依存しないため、作動許容温度が高く放熱を容易に行うことができる。SPSシステムで対象となるSバンドからXバンドにわたる周波数帯域では、単一素子において電子管と固体素子で

の出力を比較すると 100 倍から 10000 倍程度電子管デバイスの方が大きい。送電用 DC-RF 変換、増幅素子として電子管は単管出力が大きいいため素子数を減らすことができるが、しかし、単管出力が大きいことは複数のアンテナ素子を 1 つのマイクロ波素子でまかなうことになり、アンテナ素子単位での位相制御によるマイクロ波ビームの方向制御に制約を受けることになる。

次に、固体素子とマイクロ波電子管の比較として固体素子増幅器(SSPA)、TWTA および MPM の比較を示す。表 1 は文献 [4] からの引用である。

TWTA は単管出力は大きい、1W 当たりの重量、体積はかなり劣ることがわかる。また、寿命や故障の発生頻度 (MTBF) も劣っている。近年、固体素子デバイスの長足の進歩により TWTA は固体素子に置き換えられつつあるが、その要因がこの比較に現れている。しかし、固体素子と TWTA を組み合わせた MPM は、単管出力は TWTA よりも劣るが、寿命及び MTBF は SSPA と同等であり、効率がよく、1W 当たりの重量、体積は格段に優

表 1 マイクロ波増幅器の比較 (C-Band)

	SSPA*	TWTA	MPM
RF Power (W)	125	25000	180
Efficiency** (%)	20-25	23	50
Weight/W (g/W)	68.04	385.56	6.35
Vol./W (cm ³ /W)	28.68	458.84	4.1
Life (year)	20	15	20
MTBF (000's hrs)	14.5	3	15

* Power combined GaAs FET performance

** include power supply efficiency

れている。輸送コストが大きな割合を占める SPS システムにとって、重量、大きさはデバイスを選択する上で優先度の高い条件である。また、デバイス自体のコスト面では、固体素子デバイスは最近の移動携帯通信システムの普及に伴い低価格か期待できる。一方、電子管デバイスでは、2.45GHz、数百 W のマグネトロンは民生用に大量生産されているため安価に入手できる。同様に低価格化を達成することが電子管デバイスにとっての大きな課題の一つである。

4.まとめ

SPS システムで使用される周波数帯域での代表的なマイクロ波電子管デバイスを紹介し、固体素子デバイスとの比較を行った。電子管デバイスは定性的特性として宇宙における大電力用デバイスとしての多くの長所を有している。しかし、デバイスの価格、重量、大きさの軽減、長寿命化は今後改善すべき課題である。固体素子と電子管デバイスを組み合わせた場合、これら性能が飛躍的に向上している。これは、今後の電子管デバイスの応用に関する方向性を示すものである。

参考文献

- [1] V.L.Granatstein, *et al.*, Proc. IEEE, Vol. 87, pp.702-716, 1999.
- [2] "Satellite Power Systems Concept Definition Study (Exhibit D), Vol.I", NASA CR3392, 1981.
- [3] "Satellite Power Systems Concept Definition Study (Exhibit D), Vol.II", NASA CR3393, 1981.
- [4] C.R.Smith, *et al.*, Proc. IEEE, Vol. 87, pp.717-737, 1999.

Development of Microwave Beam Control System with Phase-controlled Magnetrons

N. Shinohara, J. Fujiwara, H. Matsumoto, and K. Hashimoto
Radio Atmospheric Science Center, Kyoto University
(E-mail: shino@kurasc.kyoto-u.ac.jp)
Fax:+81-774-38-3818

In order to propose a new SSX-MPT system, we have developed a phase-controlled magnetron and have demonstrated an active phased array with two phase-controlled magnetrons in METLAB (Microwave Energy Transmission LABORatory) in Kyoto University. For a new transmitter system with revised magnetrons, we use a frequency locking technique with PLL-like feedback loop. The frequency locking is accomplished by operating the magnetron as a reflection amplifier, and can be used in coherent radar system.

A required power level of reference signal which is injected into the phase-controlled magnetron is about 10 to 13 dB below the RF output power of the magnetron. We could use a solid-state driver to produce the locking reference signal for a magnetron with the output power of hundreds of watts. Magnetron frequency is then automatically tuned to that of the locking signal. If this condition is met, there will be just 90 degree between the phases of the reference signal and of the magnetron RF output.

A magnetron can be tuned either internally or externally by a mechanical motion that changes the resonant frequency of the tube. It can also be tuned electronically in two different ways. One is to change a magnetic force by using an external coil. The other is to change an anode current flow. Once the microwave phase from a magnetron becomes controllable, we could easily construct an active phased array with magnetrons. We developed a phase-controlled magnetron system with an anode current feed-back.

The frequency of a magnetron output microwave and a reference signal frequency are compared at a mixer. Through a LPF, we obtain a difference of two frequencies. Using the difference, we control an anode current and lock the magnetron frequency at the reference signal frequency. After the magnetron frequency is locked at the reference signal frequency, we could control the phase with an inserted phase shifter.

With two phase-controlled magnetrons, we have constructed an active phased array and have carried out a beam control experiment. For the experiment, we used standard horn antennas with the aperture size of 28 X 38 cm and the gain of 16.9 dBi. The element spacing is 30 cm ($=2.45 \lambda$). The experimental results agree well with the theoretical results.

Normally, we must make the element spacing of the phased array below 1λ in order to suppress grating lobes and suppress side lobes. However the microwave power is fed from the magnetron to a transmitting antenna through a waveguide in our system. Therefore the side lobe levels are still huge as seen in Fig.3. This wide spacing comes simply from the condition that a coaxial feeder and a small aperture antenna like a dipole in such a large power microwave. It is future work to decrease the element spacing and decrease a level of side lobes.

We have two objectives of the SSX-MPT experiment ; One is to establish a stable system for space use under the ionospheric plasma condition. The other is to carry scientific experiments concerning the interaction of the high power density microwave beam with the surrounding space plasma environments. Using magnetrons, it is easier and less expensive to achieve higher microwave power density compared to a system based on the semi-conductor microwave amplifiers. The present system provide more realistic system for a study of a detailed nonlinear interactions between an intense microwave and ionospheric plasma.

In order to meet a requirement on its size and power source for the JEM-EF, we are now designing a new SSX-MPT system with the phase-controlled magnetron (Fig.4). Supplied power from the ISS is limited to 3 kW. Therefore, we will have to use batteries for intermittent power transmission of 5 kW microwave.

位相制御マグネトロンを用いたマイクロ波ビーム制御システムの開発研究

篠原 真毅、藤原 淳輔、三谷 友彦、松本 紘、橋本弘 藏
京都大学 超高層電波研究センター
(E-mail: shino@kurasc.kyoto-u.ac.jp)
Fax:+81-774-38-3818

1. はじめに

現在の SPS 構想ではレトロディレクティブ機能を持つシステムが考えられている。レトロディレクティブ方式を採用する際には所望方向への正確なビーム走査が重要となり、送電アンテナにおいて正確に位相を制御することが要求される。本研究では高効率、大電力出力という電力伝送において本質的な長所を持つマグネトロンを送電システムの DC-RF 変換器として用い、レトロディレクティブ機能を持つ実証実験システムの構築を目的としている。マグネトロンは位相制御が困難という欠点を持つため DC-RF 変換器として適用するためにはこの欠点を克服することが重要な課題となる。そこで本公演ではこの欠点を補完する手法について述べ、さらに開発した位相制御マグネトロンを 2 台用いてビーム制御を実現したことについて述べる。

2. 位相制御型マグネトロンの開発

マグネトロンに対し、周波数の異なる弱い基準信号を注入すると、その信号強度比により決定される周波数差以内であれば、マグネトロンからの発生マイクロ波は弱い基準信号に同期することは昔から知られており[1]、Alder によって定式化されている[2]。しかし、この注入同期では、基準信号強度はマグネトロンのそれの-30dB 程度とすれば、マグネトロンの周波数 2450MHz に対して周波数ロック幅が 1.5MHz、0.06%程度しかないことが、Alder の式から導かれ、実験的にも確かめられている。マグネトロンの周波数は時間的に不安定であり、注入同期だけでは一度周波数ロックから外れた場合、再び周波数が基準信号にロックすることはなく、安定なシステムとは言い難い。

この欠点を補うために、我々の研究グループではマグネトロンの出力と基準信号を比較し、その結果でマグネトロンのアノード電流を制御してマグネトロンの周波数を基準信号に近づけるフィードバックを開発した。信号の比較結果を用いてマグネトロンの発信周波数を制御する方法はこれ以外にもマグネトロンの印加磁場を制御する方法もあり、Brown によって開発されている[3]。しかし、磁場制御方法では現在の民生用マグネトロンで用いている永久磁石を電磁石化する必要があるため、安価な民生用マグネトロンをそのまま用いることができない。アノード電流制御であれば電源へのフィードバックであるため安価な民生用マグネトロンをそのまま用いることが可能であるため、今回はアノード電流制御を選択し、開発を行った。印加磁場制御フィードバックシステムも我々の枝研究グループで現在研究が進行している。

アノード電流制御による位相制御型マグネトロンのブロックダイアグラムを図 1 に示す。マグネトロン出力と基準信号とをミキサで比較し、低域通過フィルター(LPF)を通して計算機に取り込み、アノード電流を制御している。図 2 にアノード電流に対するマグネトロンの周波数の変化、及び LPF の出力電圧の変化を示す。赤い線(2.45GHz)が基準信号の周波数であり、マグネトロン周波数と基準信号周波数が一致している時($f_{ref}=f_0$)、LPF の出力電圧が 0 になっていることが分かる。この時が周波数がロックした状態であり、この状態になるまでアノード電流を制御する。このフィードバックシステムは PLL と同様の動作をするもので、周波数ロックした場合、マグネトロンの出力の位相と基準信号の位相は常に 90° に保たれる。そのため、基準信号の位相を移相器で変化させることでマグネトロンの位相も変化させることが可能となり、マグネトロンを用いたアクティブフェイズドアレイを構築することが可能となる。

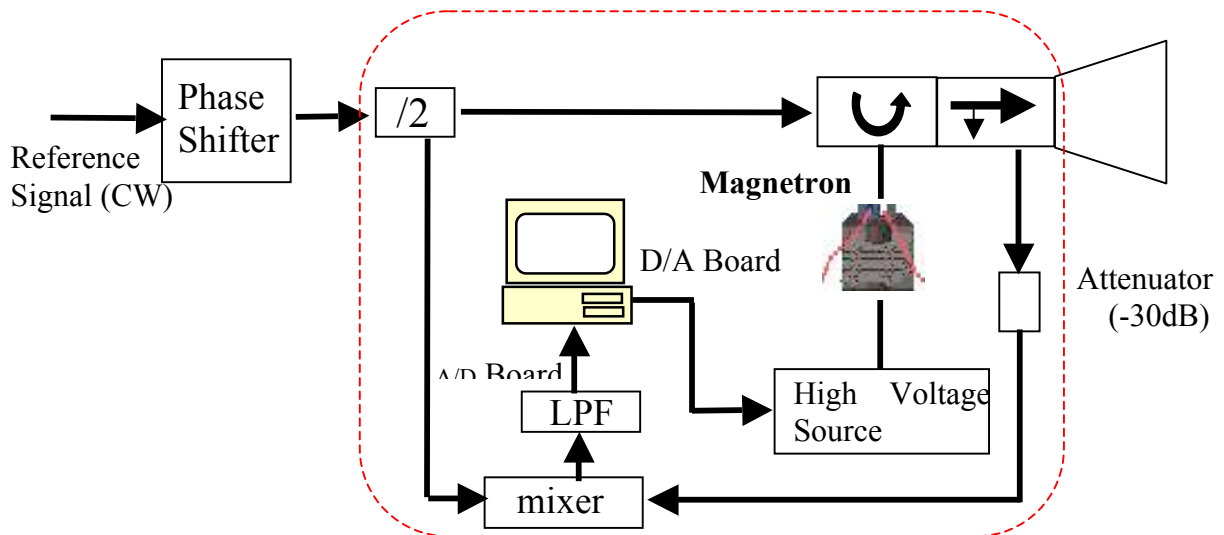


図1 アノード電流制御による位相制御型マグネトロンのブロックダイアグラム

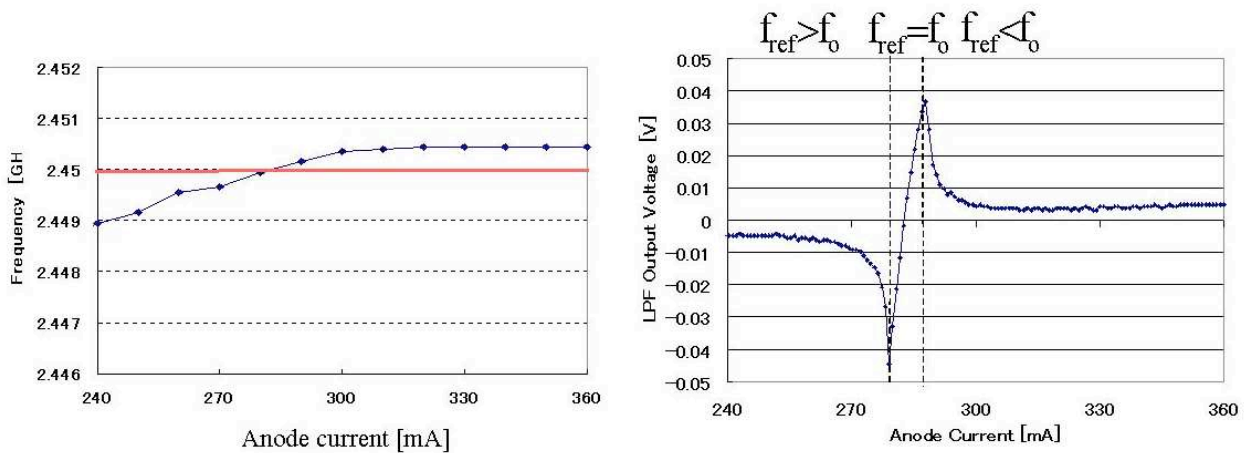


図2 アノード電流に対するマグネトロンの周波数の変化、及びLPFの出力電圧の変化

3. 位相制御型マグネトロンを用いたアクティブフェイズドアレイ

位相制御型マグネトロンを2つ用いて、アクティブフェイズドアレイを構築し、実験を行った。マグネトロンの出力は導波管で放射されるため、アンテナは28cm×30cmの開口形を持つ利得16.9dBiのホーンアンテナを用いた。2アンテナの素子間隔はホーンアンテナの開口形の物理的制限から決まり、30cm(=2.45λ)である。図3に2素子ホーンアンテナを用いたアクティブフェイズドアレイアンテナを用いたビーム制御の実験結果を示す。90°が正面方向を示し、左図がマイクロ波ビームを85°方向、つまり左に5°に向けた場合のビームパターンであり、右図がマイクロ波ビームを95°方向、つまり右に5°に向けた場合のビームパターンである。ドット付きの桃色のデータが実験値を表し、青い曲線が理論値を示している。これより、マイクロ波方向が理論通りに制御できていることが分かる。現在は利得の大きいホーンアンテナを用いた2素子アレイであるために、ビームの振れ角は±10°程度であるが、今後、アンテナの小型化による素子間隔の接近と素子数の増加により、ビームの振れ角はさらに大きくすることは可能であると考えている。

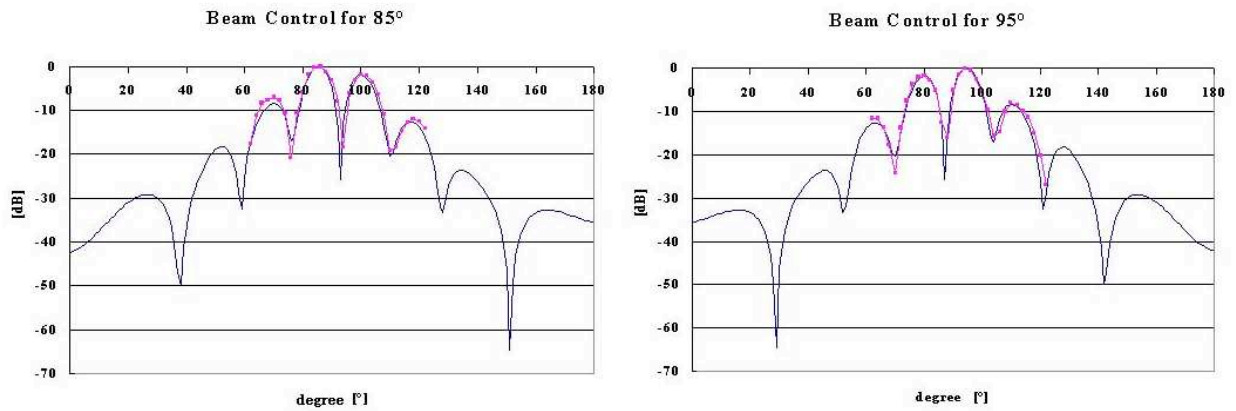


図 3 2 素子ホーンアンテナを用いたアクティブフェイズドアレイアンテナの指向性。90° が正面方向を示し、左図はマイクロ波ビームを 85° 方向、つまり左に 5° 向けた場合のビームパターン、右図はマイクロ波ビームを 95° 方向、つまり右に 5° 向けた場合のビームパターンを示す。

4. JEM 曝露部上での新しいマイクロ波送電実験システムの提案

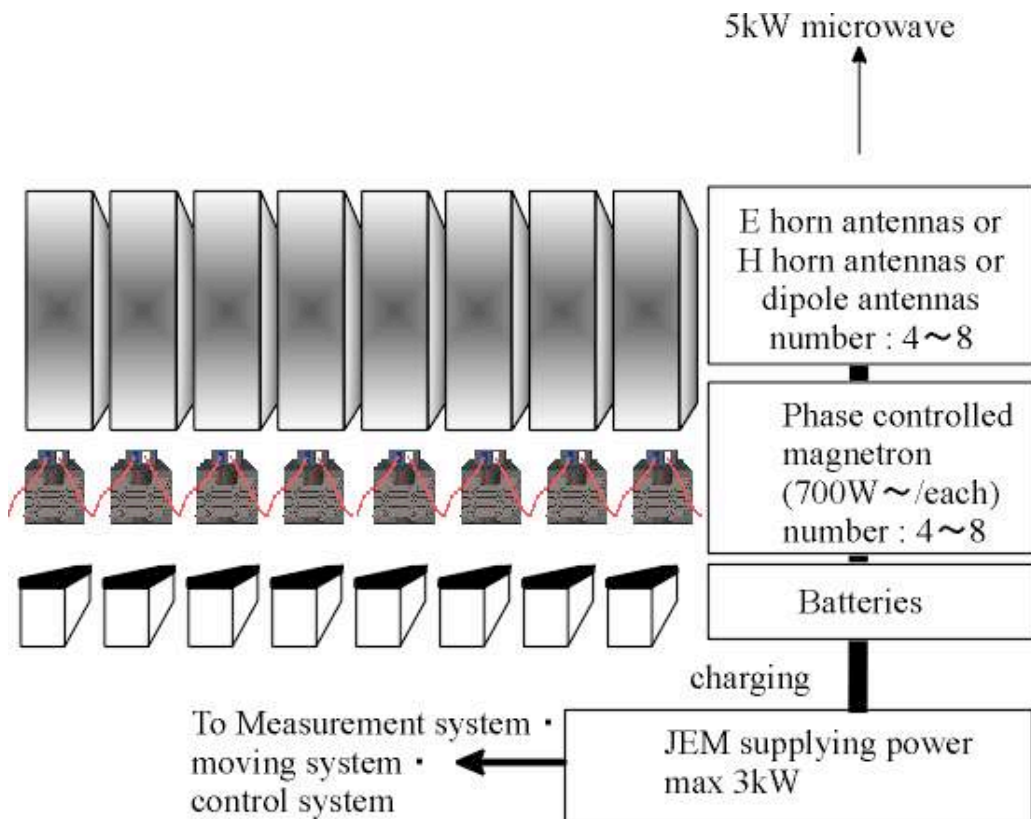


図 4 位相制御型マグネトロンを用いた JEM 曝露部上での新しいマイクロ波送電実験システム素案

1997 年に我々の研究グループでは国際宇宙ステーションの JEM 曝露部上でのマイクロ波エネルギー伝送実験の提案を行ったが、残念ながら採択には至らなかった。本研究はその結果を踏まえ、前回の提案を改良するために実施したものである。前回の実験提案ではマイクロ波送電機として、4 分割展開型の 340 素子のマイクロストリップアンテナアレイアンテナと、アンテナ素子の背面にそれぞれ取り付けられた 1W(最大 2W)半導体増幅器で構成されていた。最大放射電力は 680W であり、2.5m の伸展ブームの先に取り付けられたレクテナや、

宇宙プラズマのあらゆる方向に向けてマイクロ波ビームを照射する計画であった[4]。放射電力やアンテナ面積、送電距離は JEM 曝露部のモジュールサイズ及び供給電源の制限から決定された。

本研究を受け、我々の研究グループでは位相制御型マグネトロンを用いた JEM 曝露部上マイクロ波送電実験システムの素案を検討中である。システムデザインは図 4 のようになる。位相制御型マグネトロンとバッテリーを組み合わせて最大放射可能電力を 5kW 程度まで増大させる。バッテリー充電中はマイクロ波送電実験を行うことができなくなるという弱点ができるが、その代わりにプラズマとマイクロ波との非線形相互作用の研究をより行い易くさせる。現在は JEM 曝露部のモジュールサイズの制限から 1 次元アレイとし、1 次元のビーム制御を行うとしているが、今後詳細な設計を行い、システムを改良する予定である。さらに我々の研究グループが平行して研究を行っているスペクトラム拡散法を応用したマイクロ波ビーム制御回路と組み合わせた実験システムを、次回の JEM 曝露部の公募実験に提案する予定である。

5. まとめ

宇宙太陽発電所構想では、当初、マイクロ波送電システムとしてマグネトロンやクライストロンを用いるとされていたが、最近の半導体の発達により FET 増幅器を用いることも検討され始めている。しかし、マイクロ波送電に用いるような大電力を発生する半導体増幅器は非常に高価であり、DC-RF 変換効率向上のための研究の必要もある。本研究で開発した位相制御型マグネトロンは、安価・高効率というマグネトロンの利点に、低雑音・位相制御可能という半導体増幅器の利点を合わせたような特徴を持ち、少なくとも JEM 曝露部でのマイクロ波送電実験のような数年先の実現を目指した実験には適していると考えられる。

今後はマグネトロン電源の改良と磁場制御式位相制御型マグネトロンの開発、太陽電池を入力とした DC-RF 変換系の完成、JEM 曝露部での実験システムの詳細検討等を行い、次回の公募実験で採用されるように努力していかなければならない。

謝辞

本研究は財団法人宇宙フォーラムよりの受託研究「JEM 搭載用マイクロ波送電実験システムの開発研究」の実施により得られた成果である。関係各位に感謝します。

参考文献

- [1] Sivan, L., 'Microwave tube transmitters - microwave technology series 9', Chapman & Hall, pp.183-188, (1994)
- [2] Alder, R., 'A study of locking phenomena in oscillators', Proc. of the IRE, 34, pp.351-357, (1946)
- [3] Brown, W. C., 'The SPS transmitter designed around the magnetron directional amplifier', Space Power, vol.7, no.1, pp.37-49, (1988)
- [4] Matsumoto, H., K. Hashimoto, N. Shinohara, M. Fujita, K. Itoh, S. Sasaki, T. Katagi, T. Itoh, J. G. Hawkins, and F. E. Little, 'Microwave Power Transmission Experiment on JEM-EF of International Space Station', Proc. of SPS'97, pp.231-236, (1997)