Research of Magnetron Phased Array with Mutual Injection Locking for Space Solar Power Satellite/Station

Naoki Shinohara Member (Kyoto University)

Hiroshi Matsumoto Non-member (Kyoto University)

Keywords: SPS, magnetron, phased array, injection locking

The SPS (Space Solar Power Satellite/Station) will be clean base-load power station in space, which will be the hugest space system. For the SPS, we need high efficient, huge, high accurate, light weight and inexpensive phased array in order to transmit energy from SPS in space to ground.

We have proposed and developed a phase controlled magnetron (PCM) with injection locking and PLL (Phase Locked Loop) technique for the high efficient, light weight and inexpensive phased array. The PLL is a control system that generates a signal that has a fixed relation to the phase of a “reference” signal. The PLL circuit responds to both the frequency and the phase of the input signals, automatically raising or lowering the frequency of a controlled oscillator until it is matched to the reference in both frequency and phase.

It has still weak points; (1) it contains approximately 10% power loss at circulator used for injection locking, (2) we need phase shifter in each PCMs for the phased array. In order to solve the weak points, we propose a magnetron phased array with mutual injection locking. For the magnetron phased array, we only use two PCMs with phase shifters and the other components are self-oscillated and mutual injection locked magnetrons (Fig. 1).

In this paper, we propose new formula for the magnetron phased array with mutual injection locking as follows;

$$\begin{aligned} \frac{d\phi}{dt} = & \Delta\omega + \frac{\omega_i \rho_i}{Q_{ext}} \sin(\psi_i - \phi_i) \\ & + \frac{\varepsilon_{i,j-1} \omega_j}{Q_{ext}} \sin(\phi_{j-1} - \phi_i) + \frac{\varepsilon_{i,j+1} \omega_j}{Q_{ext}} \sin(\phi_{j+1} - \phi_i) \\ & + \frac{\varepsilon_{i,j-2} \omega_j}{Q_{ext}} \sin(\phi_{j-2} - \phi_i) + \frac{\varepsilon_{i,j+2} \omega_j}{Q_{ext}} \sin(\phi_{j+2} - \phi_i) \\ (i = 1, 2, \dots, N) \dots\dots\dots (1) \end{aligned}$$

Where $\Delta\omega$ is frequency difference between the oscillator and extra injection signal. ω_i , ϕ_i are self-oscillation frequency and phase of each oscillator, respectively. ε_{ij} is collection factor and

Fig. 1. Proposed magnetron phased array with mutual injection locking

$\rho_{ij} = \sqrt{P_{inji}/P_i}$ ($i = 1, N$) where P_{inji} is power of extra injection locking signal and P_i is power of oscillator. ψ_i is phase of extra injection locking signal. This formula indicates mutual injection locking of phase controlled magnetron and it contains mutual coupling from next and two from next.

We also show experimental results of beam direction control with the magnetron phased array with mutual injection locking. Experimental setup is shown in Fig. 2. We can explain the experimental results with the formula (1). The experimental results and theoretical results are in good agreement (Fig. 3).

Fig. 2. Experimental setup

Fig. 3. Beam pattern when phase difference of both ends of magnetrons is 90°. Theoretical pattern is calculated with Eq. (1)

宇宙太陽発電所 SPS のための相互間注入同期法を用いた マグネトロン・フェーズドアレーの研究

正員 篠原 真毅* 非会員 松本 紘**

Research of Magnetron Phased Array with Mutual Injection Locking for Space Solar Power Satellite/Station

Naoki Shinohara*, Member, Hiroshi Matsumoto**, Non-member

The SPS (Space Solar Power Satellite/Station) will be clean base-load power station in space. It will be hugest space system and we need high efficient, huge, high accurate, light weight and inexpensive phased array for the SPS in order to transmit energy generated in space from space to ground. We have proposed and developed a phase controlled magnetron (PCM) with injection locking and PLL technique for the high efficient, light weight and inexpensive phased array. It has still weak points; (1) it contains approximately 10% power loss at circulator for injection locking, (2) we need phase shifter in each PCMs for the phased array. In order to solve the weak points, we propose a magnetron phased array with mutual injection locking. For the magnetron phased array, we only use two PCMs with phase shifters and the other components are self-oscillated and mutual injection locked magnetrons. In this paper, we propose new formula for the magnetron phased array with mutual injection locking. We also show experimental results of beam direction control with the magnetron phased array with mutual injection locking.

キーワード：宇宙太陽発電，マグネトロン，フェーズドアレー，注入同期

Keywords: SPS, magnetron, phased array, injection locking

1. はじめに—宇宙太陽発電所 SPS とは—

宇宙太陽発電所 SPS (Space Solar Power Satellite/Station) とは、地球の歳差運動のために 1 年を通じてほとんど地球の影に入らない静止衛星軌道 (36,000 km 上空) に巨大な太陽電池衛星を建設し、そこで発電した電力をマイクロ波 (= 1–10 GHz 程度の電磁波) もしくはレーザー光を用いて地上に無線電力伝送し、地上でその電力を活用しようという構想である。地球の半径約 6,000 km に対し、SPS が配置される 36,000 km 上空の関係は、Fig. 1 左下にあるようになり (図は夏と冬の位置の例)、1 年のほとんどで SPS は地球の影に入らないのである。特にマイクロ波を用いた無線電力伝送は電離層での反射・散乱や大気・雨での吸収・散乱がほとんどない「電波の窓」と呼ばれる周波数帯を用いているために曇りや雨でも太陽光発電の電力を利用でき

るという利点を持つ。経済性の観点から SPS は地上で 100 万 kW 以上を利用できる設計がほとんどである。SPS は夜昼・天候に無関係でかつ温室効果ガスをほとんど放出しない⁽¹⁾ という原子力発電と並ぶ将来の基幹電源となる可能性がある発電所である。1960 年代のマイクロ波無線電力伝送の研究⁽²⁾ に触発され、1968 年に SPS がはじめて提唱⁽³⁾ されて以降、1970 年代にはアメリカで⁽⁴⁾、1990 年代以降は日本^{(5)–(7)} を中心とした世界中^{(8)–(9)} で様々な SPS の検討が行われ、要素技術研究が続いている。SPS はエネルギー源を

Fig. 1. Concept of SPS.

* 京都大学生存圏研究所

〒611-0011 宇治市五ヶ庄

Research Institute for Sustainable Humansphere, Kyoto University
Gokasho, Uji 611-0011

** 京都大学

〒606-8501 京都市左京区吉田本町

Kyoto University

Yoshida Hon-machi, Sakyo-ku, Kyoto 606-8501

宇宙空間に求めるため、人間の「成長の限界⁽¹⁰⁾」を打破できる可能性がありつつも⁽¹¹⁾、同時に発電所としてのコストも、将来の技術進歩を見込めば現在の発電方式と変わらないという試算があり⁽¹²⁾、現在から未来をつなぐ将来の発電所として期待が高い。

SPS は温暖化ガスを放出しない基幹電源とできる利点を生かし、かつ経済性をあげるために、約 100 万 kW の電力を無線で約 36,000 km 伝送するシステムとなっている。そのために、太陽電池の大きさ数 km 四方、マイクロ波エネルギーの送電アンテナ、受電アンテナ共に数 km の大きさを必要とし、それでありながら重量 8-9 千トン程度に抑える必要があると試算されている。Fig. 1 は SPS の概略イメージ図である。太陽電池技術、宇宙プラズマ中での 100 万 kW の集配電技術、超大規模宇宙構造物の建設・保守・運用技術、ロケット技術等、多岐にわたる研究課題を一つ一つクリアすべく、様々な研究が現在も行われている。本研究で着目したのは SPS 実現に必須課題である超大型アレーアンテナによるマイクロ波無線電力伝送技術である。本研究では超大型アレーアンテナの中でも SPS に必須であるが現在は高コスト体質であるフェーズドアレー技術の容易・安価な構成法を提案し、その実証実験を行った結果を示す。

2. マイクロ波無線電力伝送への要求

マイクロ波無線電力伝送ではマイクロ波自体をエネルギー輸送媒体（＝キャリア）とするため、通信やレーダーと異なり何らかの情報をキャリアに印加（変調やパルス）する必要がなく、無変調連続波、ビュア・スペクトルで十分であり、周波数帯域も発振器の Q や位相雑音限界まで狭くすることができる。また、マイクロ波無線電力伝送での損失は、電力からマイクロ波への変換際の損失、アンテナから放射されたマイクロ波が広がりを持ち受電アンテナに収集されないために発生する損失、受電アンテナで収集されたマイクロ波を再び電力に戻す際の損失、の 3 つの大きな損失を考えなくてはならない。SPS では宇宙で発生した電力と地上で利用できる電力の比であるマイクロ波無線電力伝送の効率として 50% を目指して研究が行われている。この効率は上記の 3 つの損失によって決まるため、50% を実現するためには上記の 3 つの損失を小さくすることが必須である。マイクロ波送電の受電側は通常アンテナと整流回路（マイクロ波-電力変換回路）が一体となった「レクテナ」とよばれるシステムが用いられる。送電側はフェーズドアレーアンテナと呼ばれるレーダー等で最近用いられているアンテナが必須である。フェーズドアレーとは複数のアンテナから放射される電波の位相と振幅を制御し、電波合成することにより所望のビーム形状を形成し、またビーム方向を制御するものである。そのため、フェーズドアレーは機械的なアンテナ面制御が不要であり、任意のアンテナ形状からビーム制御を行うことができることが特徴である。SPS は衛星であるために、位置や姿勢、アンテナ形状が固定される保証がなく、ビーム方向を常に受電サイトに向け

て制御をしておかなくてはならないからである。

フェーズドアレーは現在も一部のレーダー等にしか用いられていない⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾。非常に高コスト体質なアンテナであることと、位相の高精度制御技術が高いハードルとなっているからである。SPS ではさらに「高効率」「超巨大」「高精度」「軽量」「安価」フェーズドアレーが求められる。現在のフェーズドアレーはすべて半導体増幅器を用いたシステムであるが、本研究では SPS に向けコストが非常に安く、かつ高効率で出力重量比で軽量であるマグネトロンを用いたフェーズドアレーを提唱し、実験を行った。

3. 位相制御マグネトロンと注入同期法

マグネトロンは電子レンジに用いられているマイクロ波発振管で、電場と磁場と共振空洞を利用して発振するために非常に高効率（70%以上）、高出力（kW 以上）でありながら他のマイクロ波機器に比べ数桁安い（1,000 円/1 台（1 kW）程度）という特徴を持つ。しかし、高出力の発振器であるがために位相の制御が困難であり、また Q が低く、雑音が多いとされていたために電子レンジのような加熱用途と、一部のパルスレーダーにしか用いられてこなかった。しかし、我々はマグネトロンの雑音要因は電源の安定度と電子放出用のフィラメント温度にあることを明らかにし、自励発振状態のマグネトロンでも直流安定化電源を用いて駆動すれば Q が 1×10^5 以上になることを示した⁽¹⁵⁾。同時に円筒形状であるマグネトロンの構造上発生が不可避な n 次高調波を除き、低周波側高周波側共に雑音が -100 dBc 以下に抑えられることも示された。n 次高調波はそれでもすべて -60 dBc 以下であり、マグネトロンを加熱以外の用途に十分用いることができることが示された。マグネトロンの雑音は電子レンジで用いるような半波倍電圧電源やパルスレーダーで用いるようなパルス電源の立ち上がり時もしくは立ち下がり時に発生することも実験的に示されており⁽¹⁶⁾、常に定格電圧を印加できる直流安定化電源ではスペクトルの Q が 3 桁以上上昇し、雑音も -100 dBc 以下に抑制できる。

このようにマグネトロンはマイクロ波エネルギー伝送にも利用可能であることが示された。しかし、自励発振のマグネトロンはまだ位相制御を行うことができないし、温度変化と共に周波数が変化していくという欠点も残っている。そこで我々はマグネトロンの周波数が印加電圧/電流値によって変化する現象と、弱い基準マイクロ波が外部からマグネトロンに注入されるとマグネトロンの周波数が基準マイクロ波の周波数にロックされるという現象を利用して、安価な電子レンジ用マグネトロンをそのまま用いて位相制御可能なマグネトロン、位相制御マグネトロン（PCM；Phase Controlled Magnetron）の開発に成功した⁽¹⁷⁾。後者の現象は注入同期法と呼ばれ、Adler によって (1) 式のように定式化されており⁽¹⁸⁾、周波数安定化に寄与する。

$$\frac{\Delta\omega}{\omega_0} = \frac{2}{Q_{ext}} \sqrt{\frac{P_i}{P_o}} \dots\dots\dots (1)$$

(a) System block diagram

(b) Photo of system

Fig. 2. Phase controlled magnetron⁽¹⁹⁾.

ω_0 は発振器（マグネトロン）の自励周波数、 Q_{ext} はマグネトロンの外部 Q 値、 P_0 はマグネトロンの振幅、 P_i は注入信号の振幅であり、 $\Delta\omega$ は注入同期可能な周波数幅、つまり、マグネトロンと注入信号の周波数差が $\Delta\omega$ 以内であればマグネトロンの周波数は注入信号の周波数にロックされるということである。周波数は (1) 式でロックされるが、位相は以下の式で示すような挙動を示し、 $\Delta\omega$ に比例して位相差が残る。

$$\frac{d\phi}{dt} = \Delta\omega + \frac{\omega_0}{Q_{ext}} \sqrt{\frac{P_i}{P_0}} \sin(\psi - \phi) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ϕ , ψ はそれぞれマグネトロンと注入信号の位相である。注入同期は半導体でも同様の現象が発生する。前者の現象を利用すればマグネトロン+電源を VCO (Voltage Controlled Oscillator) とみなすことができるため、位相を制御するための PLL (Phase Locked Loop) 制御を行い、位相を安定化/制御することができるようになる。Fig. 2 は位相制御マグネトロンのシステムブロック図である⁽¹⁹⁾。我々はこの PCM を複数用いて実際にマイクロ波送電用フェーズドアレーを構築し、ビーム制御実験にも成功している⁽¹⁹⁾。実験は 2.45 GHz と 5.8 GHz 無変調連続波 (CW) の両システムで行っている。位相安定度も 1° 以下と非常に安定しており、フェーズドアレーに用いるには十分な性能である。さらに振幅も同時に制御可能とした位相振幅制御マグネトロンの開発にも成功している⁽²⁰⁾。

PCM は安価高効率高出力で位相制御可能ではあるが、SPS のためにはより安価に、より高効率にする必要がある。PCM は注入同期のために導波管サーキュレータを用いており、10% 程度のマイクロ波損失と共に重量増を招いている。また、フェーズドアレーを構築した際、1 台の PCM 毎に移相器が 1 台必要となる。そこで我々は半導体を用いたフェーズドアレーで時々用いられているフェーズドアレーを構成する素子間の漏れマイクロ波を用いた注入同期法をマグネトロンフェーズドアレーに応用することを提案する。

4. 相互結合を利用した位相制御マグネトロンフェーズドアレー

〈4・1〉 基礎理論 半導体を用いたフェーズドアレーでは、隣同士のアンテナの相互結合による漏れマイクロ波、もしくは直接的にライン等で結合させたマイクロ波を注入信号として半導体発振器に注入同期法を用い、周波数安定とビーム制御を行う⁽²¹⁾⁽²²⁾。この場合、素子同士の結合により、以下に示す Adler の式によりそれぞれの発振器の位相が一意に決定される⁽²¹⁾。

$$\begin{aligned} \frac{d\phi_i}{dt} = & \Delta\omega + \frac{\varepsilon_{i,j-1}\omega_i}{Q_{ext}} \sin(\phi_{i-1} - \phi_i) \\ & + \frac{\varepsilon_{i,j+1}\omega_i}{Q_{ext}} \sin(\phi_{i+1} - \phi_i) \quad (i = 1, 2, \dots, N) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (3)$$

(3) 式は N 個の発振器の素子間結合を用いた注入同期現象を表す連立方程式であり、 ω_i , ϕ_i はそれぞれ各発振器の自励周波数及び位相、 ε_{ij} は i 番目と j 番目の素子間の結合強度を表している。素子間の結合強度 ε_{ij} は、発振器 j から発振器 i の方向への信号の電力を P_{ij} 、発振器 i の出力電力を P_i とすると以下のように表すことができる。

$$\varepsilon_{ij} = \sqrt{\frac{P_{ij}}{P_i}} \quad \dots\dots\dots (4)$$

また (3) 式で、両端の発振器については隣が 1 つしかないため、添字が 0 あるいは $N+1$ となる項は無視する。(3) 式で結合強度 ε_{ij} の値がすべて等しいと仮定すると、各発振器の自励周波数を以下のように設定することにより、各発振器の位相を両端の発振器間位相差を等分割した形にすることができる。つまり、

$$\phi_i - \phi_{i-1} = \Delta\phi \text{ (一定値)} \quad \dots\dots\dots (5)$$

が (3) 式の解の 1 つとなりうる。(5) 式を (3) 式に代入し定常状態 ($d\phi_i/dt = 0$) を考えることにより、各発振器の自励周波数についての以下の必要条件が出てくる。

$$\omega_i = \begin{cases} \omega_0 + \Delta\omega & (i = 1) \\ \omega_0 & (1 < i < N) \\ \omega_0 - \Delta\omega & (i = N) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで ω_0 は目標とする出力周波数、 $\Delta\omega = \varepsilon\omega_0/Q_{ext} \cdot \sin \Delta\phi$ である。すなわち両端の発振器の自励周波数を、目標とす

Fig. 3. Concept of phased array of PCMs with mutual injection locking.

る出力周波数に対して、お互いに反対方向に $\Delta\omega$ だけずらすことにより、各発振器の位相が両端の発振器間位相差を等分割した形にすることができる。ある $\Delta\omega$ の値に対して、 $\Delta\phi$ の値が2つ存在するが、実際は発振器間位相差 $\Delta\phi$ のとりうる範囲が $-90^\circ < \Delta\phi < +90^\circ$ に限られる。したがって $\Delta\omega$ を決めると $\Delta\phi$ が1つに決まり、ビームの方向制御が可能となる。つまり、両端の発振器の周波数さえ制御してやれば移相器不要でビーム制御が可能となる。つまり、マグネトロンフェーズドアレーの場合、両端に位相制御マグネトロンを用い、その他は自励発振のマグネトロンを用いるだけで相互結合によりビーム方向が制御できるということになる。その場合のマグネトロンフェーズドアレー構成の例を Fig. 3 に示す。

〈4・2〉 マグネトロンへの応用 しかし、マグネトロンの自励発振はそのままと温度特性等により安定度が悪いことは先に述べた。電子レンジ用マグネトロンの自励発振周波数の時間変化の例を Fig. 4 に示す。変動幅は約 6×10^{-5} 程度と小さいものの、この変動の元で相互結合による注入同期がかかるか、検証してみなければならない。また、基本方程式は (3) 式を用いるが、Fig. 3 にあるように $i = 1, N$ 番目のマグネトロンには (2) 式で決まる直接の注入同期法を用いているため、相互結合を用いたマグネトロンフェーズドアレーの場合、(2) 式と (3) 式を組み合わせた以下の新しい式を用いることになる。

$$\begin{aligned} \frac{d\phi}{dt} = & \Delta\omega + \frac{\omega_i \rho_i}{Q_{ext}} \sin(\psi_i - \phi_i) \\ & + \frac{\varepsilon_{i,j-1} \omega_i}{Q_{ext}} \sin(\phi_{i-1} - \phi_i) + \frac{\varepsilon_{i,j+1} \omega_i}{Q_{ext}} \sin(\phi_{i+1} - \phi_i) \\ (i = 1, 2, \dots, N) \dots\dots\dots (7) \end{aligned}$$

ここで ρ_i は、両端のマグネトロンからの放射マイクロ波の振幅に対する外部注入信号の振幅で、放射マイクロ波の電力を P_i 、外部注入信号の電力を P_{inji} とすると、次式で表される。

$$\rho_{ij} = \sqrt{\frac{P_{inji}}{P_i}} \quad (i = 1, N) \dots\dots\dots (8)$$

また ψ_i は両端の外部注入同期信号の位相である。 ρ_i と ψ_i はいずれも $i = 1, N$ のときのみ存在し、他の場合は0である。

Fig. 4. Time dependence of self-oscillated frequency of cooker-type magnetrons.

(7) 式で結合強度 ε_{ij} 及び注入信号強度 ρ_i の値がすべて等しいと仮定する。このとき、前節と同様、(5) 式を (7) 式に代入し定常状態 ($d\phi/dt = 0$) を考えることにより、各アンテナの位相が両端のアンテナ間位相差を等分割した形になるための、各マグネトロンの自励周波数の条件が出てくる。

$$\omega_i = \begin{cases} \omega_{int} + \Delta\omega_1 & (i = 1) \\ \omega_{int} & (1 < i < N) \dots\dots\dots (9) \\ \omega_{int} - \Delta\omega_N & (i = N) \end{cases}$$

ここで

$$\Delta\omega_i = \frac{\varepsilon \omega_i}{Q_{ext}} [\sin \Delta\phi - \sin(\phi_i - \psi_i)] \quad (i = 1, N) \dots\dots\dots (10)$$

ある $\Delta\omega_i$ の値に対して、 $\Delta\phi$ の値が2つ存在するが、実際はアンテナ間位相差 $\Delta\phi$ のとりうる範囲は $-90^\circ < \Delta\phi < +90^\circ$ に限られる。さらにすべてのマグネトロンの自励周波数が外部注入同期信号の周波数に一致したとする。すなわち

$$\omega_i = \omega_{inj} \quad \text{for all } i \dots\dots\dots (11)$$

となったとする。このとき $\phi_1 - \psi_1 = \Delta\phi$ 、 $\phi_N - \psi_N = \Delta\phi$ となるので結局、

$$\psi_N - \psi_1 = (N + 1) \Delta\phi \dots\dots\dots (12)$$

が得られる。すなわち、すべてのマグネトロンの自励周波数が、両端の外部注入同期信号の周波数と一致すると、外部注入信号間の位相差が等分割され各アンテナに割り当てることができる。 $|\psi_N - \psi_1| < 180^\circ$ であれば、 $\Delta\phi$ は1つに決まる。 $|\psi_N - \psi_1| > 180^\circ$ の場合については次節で触れる。さて、このシステムにおいても、マグネトロンの自励周波数の不安定性が出力の位相の安定度、ビームの方向制御の安定度に影響を与える可能性のあることは容易に想像できる。ただし、前節のシステムと異なるのは、マグネトロンの自走周波数が揺らいでも周波数ロック範囲内であれば、各出力の周波数は外部注入信号の周波数に同期しているという点である。

Fig. 5. Transit response on ideal condition.

Fig. 6. Time dependence of phase of magnetrons.

〈4・3〉 シミュレーション (7) 式でモデル化されるシステムの基本的な性質を調べるため、単純なシミュレーションをいくつか行う。本節では断りがない限りすべてのシミュレーションにおいて、アンテナ数 $N = 4$ 、マグネトロンの外部 Q 値 $Q_{\text{ext}} = 174$ 、両端の外部注入信号間位相差 $\psi_4 - \psi_1 = 90^\circ$ としておく。 $N = 4$ は SPS で用いるような何十億素子に比べれば極めて少ないアンテナ数であるが、実験的な制約と、外部注入同期の基礎物理を理解するために用いたものである。外部 Q 値はマグネトロンの実験値から設定している。まず、理想的な状態について調べる。本システムでは、隣接するアンテナ間の結合強度 ε_{ij} がすべて等しく、また外部注入信号の強度 ρ とも等しいことが仮定されている。ここで、すべてのマグネトロンの自走周波数 ω_i が、両端の外部注入同期信号の周波数 ω_{inj} と一致すると、外部注入信号間の位相差が等分割されるということであった。これは解析的にも簡単に導くことができたが、過渡応答を含めて示す。 $\varepsilon = \rho = \sqrt{1[\text{W}]/500[\text{W}]} = 0.0447$ 、 $\omega_i = \omega_{\text{inj}} = 2.45[\text{GHz}]$ とした場合のシミュレーションの結果を Fig. 5 に示す。Fig. 5 より約 $4\mu\text{s}$ で定常状態に落ち着き、各位相が等分割されていることがわかる。

次にマグネトロンで問題が発生する可能性がある自励周波数の揺らぎの条件下での相互間注入同期に関するシミュレーション結果を示す。Fig. 4 に示した自励周波数の変動データを用いたシミュレーションを行う。マグネトロンの放射電力も実データを用いる。他のパラメータについても他のシミュレーションと同様、マグネトロンの外部 Q 値 $Q_{\text{ext}} = 174$ 、外部注入信号の周波数 $\omega_{\text{inj}} = 2.45\text{GHz}$ 、外部注入信号電力 $P_{\text{inj}} = 1\text{W}$ と設定する。隣接するアンテナに漏れるマイクロ波の電力を放射電力の -33dB とする。

両端の外部注入信号間位相差 $\psi_N - \psi_1 = 90^\circ$ とし、Fig. 4 の 1 時間分の測定データを用いてシミュレーションした結果を Fig. 6 および Fig. 7 に示す。Fig. 6 は各出力の位相の時間変化を示している。一方、Fig. 7 は Fig. 6 の位相の結果の中から 1 分ごとのデータを取り出し、それぞれビーム

Fig. 7. Time dependence of beam pattern (only array factor).

パターンを計算したものを重ね合わせたものである。Fig. 6 のように、各マグネトロンの自励周波数が時間的に変動するに伴い出力の位相も大きく変化しているが、この変化が各アンテナ間で無相関ではなく、すべての位相が連動して変化しているため、Fig. 7 のようにメインビームの方向は時間変化せず、サイドロープについてもほぼ変化しないといえる。このことから、本システムはマグネトロンのように自励周波数が不安定な発振器を用いてもフェーズドアレーのビーム方向制御が可能であり、また逆にビーム制御に非常に適しているといえる。

〈4・4〉 実験 前節で示したシミュレーション結果の検証のために実際の相互間注入同期を用いたマグネトロンフェーズドアレーの実験を行った。実験はシミュレーションと同様 Fig. 4 のデータを取得した 4 台のマグネトロンを用い、アンテナには Fig. 8 に示すホーンアンテナを用いた。周波数は 2.45GHz で、4 素子を物理限界の 0.86λ (約 10.5cm) 間隔に配置した 1 次元アレーを用いて実験を行った (Fig. 9)。

実験システムの構成図を Fig. 10 に、実験の様子を Fig. 11 に示す。Fig. 9 の 1 次元 4 素子ホーンアンテナアレーの両

Fig. 8. Horn antenna for experiment.

Fig. 9. 1-D array for experiment.

Fig. 10. Experimental setup.

端に位相制御マグネトロンを、中2つに自励発振のマグネトロンをそれぞれ接続し、電波暗室内で回転台にシステム一式を乗せ、ビームパターンを測定した。

このアレーでの結合係数の実測を行った結果が Table 1 である。この※の結果を用いて (2) 式から結合係数を求めることが出来る。実験値と理論値の比較のため、(7) 式を用いた理論検討に必要なその他のパラメータも Table 2 に示すように実測している。

Fig. 12 は正面方向のフェーズドアレーのビームパターンである。シミュレーションは、4つのホーンアンテナそれ

Fig. 11. Photo of experiment.

Table 1. Measurement of leak microwave power.

	Leak Power (mW)	Leak Power / Radiated Power (dB)
From 1 Next ※	300	-33
From 2 Next	120	-37
From 3 Next	34	-44
From 4 Next	41	-43
From 5 Next	2	-56

Table 2. Experimental parameters of magnetron phased array.

Frequency of External Injection Locking Signal	2.45GHz
Frequency of Self-Oscillated Frequency	2.45 for all i
Power of External Injection Locking Signal	1W
Radiated Power from Magnetron (i=1)	590W
Radiated Power from Magnetron (i=2)	490W
Radiated Power from Magnetron (i=3)	405W
Radiated Power from Magnetron (i=4)	440W
Ratio between Leak Power / Radiated Power	-33dB
External Q of Magnetron	174

ぞれのビームパターンの実測値を用いてビーム合成した結果であり、よく一致していることが分かる。

続いて両端のアンテナの位相差を 30° , 90° , 150° とした場合のビーム制御実験結果と、Table 2 のパラメータと (7) 式を用いたシミュレーション結果を元に各アンテナの

Fig. 12. Beam pattern (0°, front).

Fig. 13. Beam pattern (30° phase deference of edge antennas).

Fig. 14. Beam pattern (90° phase deference of edge antennas).

Fig. 15. Beam pattern (150° phase deference of edge antennas).

パターン実測値から計算したビームパターン理論値の結果を Fig. 13～Fig. 15 に示す。その他の位相差を与えた場合の主ビームの角度の実験値と理論値の比較を Table 3 に示す。これから明かなように、両端の位相差が小さいうちは理論と実験が比較的一致しているが、両端の位相差を大きくしていくと徐々に実験値と理論値が離れていくことが分かる。各アンテナの位相差を詳しく調べてみると、理論では等分されるはずの位相差が、実験では内側 2 つのアンテナの位相差が接近していることが判明した。(7) 式から得られる位相と実験値との比較を Fig. 16 に示すが、理論値と実験値があまりあっていない。

〈4・5〉 改良理論と実験 両端の位相差を大きくしていくと徐々に実験値と理論値が離れていく原因は Table 1 に示す 2 つ隣からの漏れ電力が予想よりも大きく、この漏れ電力でも注入同期がかかってしまったためではないかと仮定した。(7) 式は隣からの漏れ電力による注入同期しかカバーしていないため、さらに 2 つ隣からの漏れ電力による注入同期もカバーする以下の新しい理論式を導入する。

Table 3. Direction of main beam (measured and theory).

Phase Difference of Edge Antennas (°)	Direction of Main Beam (Measured) (°)	Direction of Main Beam (Theory) (°)	Error (°)
-150	+8	+11.2	-3.2
-120	+6	+8.75	-2.75
-90	+6	+6.46	-0.46
-60	+4	+4.26	-0.26
-30	+2	+2.13	-0.13
0	+2	0	-2
+30	0	-2.13	+2.13
+60	-2	-4.26	+2.26
+90	-4	-6.46	+2.46
+120	-6	-8.75	+2.75
+150	-6	-11.2	+5.2

(a) Antenna 2

(b) Antenna 3

(c) Antenna 4

Fig. 16. Phase difference between antenna (vs. antenna 1) (measured and theory).

Fig. 17. Simulation results of phase difference of each antenna (by Eq. (13)).

Table 4. Direction of main beam (measured and theory by Eq. (13)).

Phase Difference of Edge Antennas (°)	Direction of Main Beam (Measured) (°)	Direction of Main Beam (Theory by Equation(13)) (°)	Error (°)
-150	+8	+9.12	-1.12
-120	+6	+6.81	-0.81
-90	+6	+4.99	-1.01
-60	+4	+3.27	-0.73
-30	+2	+1.63	-0.37
0	+2	0	-2
+30	0	-1.63	+1.63
+60	-2	-3.27	+1.27
+90	-4	-4.99	+0.99
+120	-6	-6.81	+0.81
+150	-6	-9.12	+3.12

$$\begin{aligned}
 \frac{d\phi}{dt} = & \Delta\omega + \frac{\omega_i \rho_i}{Q_{ext}} \sin(\psi_i - \phi_i) \\
 & + \frac{\varepsilon_{i,j-1} \omega_i}{Q_{ext}} \sin(\phi_{i-1} - \phi_i) + \frac{\varepsilon_{i,j+1} \omega_i}{Q_{ext}} \sin(\phi_{i+1} - \phi_i) \\
 & + \frac{\varepsilon_{i,j-2} \omega_i}{Q_{ext}} \sin(\phi_{i-2} - \phi_i) + \frac{\varepsilon_{i,j+2} \omega_i}{Q_{ext}} \sin(\phi_{i+2} - \phi_i) \\
 & (i = 1, 2, \dots, N) \dots\dots\dots (13)
 \end{aligned}$$

(13) 式を用いてシミュレーションをしておし、測定結果との比較を行うこととする。アンテナ間結合強度 ε は Table 2 より、隣のアンテナには -33 dB、2つ隣のアンテナには -37 dB 漏れこむとして計算した結果を用いる。まず目標の両端アンテナ間位相差に対する各アンテナの位相をシミュレーションした結果を Fig. 17 に示す。予想通り、2つ隣のアンテナとの結合を考慮すると位相は等分割されず、内側の2つのアンテナの位相が近くなるという結果となった。次に、アンテナ1の位相を基準とした場合の他のアンテナの位相を、測定値とシミュレーションとで比較したものを Fig. 18 に示す。これらの図を Fig. 16 と比べると、測

Fig. 18. Phase difference between antenna (vs. antenna 1) (measured and theory by Eq. (13)).

Fig. 19. Beam pattern (90° phase difference of edge antennas) (theory by Eq. (13)).

定値とシミュレーションとの位相の一致の程度が高くなっていることがわかる。

(13) 式を用いて理論値を計算し直し、実験と比較した表が Table 4 であり、ビームパターンの一例として両端のアンテナ位相差を 90° とした場合の結果を Fig. 19 に示す。(7) 式を用いた理論値よりもよく一致していることが分かる。

5. まとめ

本論文ではこれまで半導体発振器アレーでしか用いられなかった相互結合による注入同期法を利用したフェーズドアレー技術を初めてマグネトロンフェーズドアレーに適用した結果を示した。位相制御マグネトロンを両端にのみ配置してフェーズドアレーをより安価に構築できる方法を提案し、実際にビーム制御にも成功した。また、Adler の理論式を位相制御マグネトロンアレーに拡張し、また 2 つ隣の漏れ波まで考慮した理論式を提唱して、より実験結果に近い理論値を計算した。本論文で示した理論と実験は SPS で用いるような何十億素子に比べれば極めて基礎的な実験に過ぎない。しかし、「両端のみの移相器で中の自励発振を制御する」結果を SPS に応用する際には、「数個に 1 つ移相器を持ち、その相互作用でその他の励発振を制御する」ことで対応できると考えている。その場合、当然相互作用が多岐にわたりより複雑な挙動を示すことが予想されるため、(13) 式をさらに発展させ、シミュレーションと実証を行う必要がある。

謝 辞

本研究は本研究大学院生（当時）の水谷浩之君の協力で行われたものである。また、本実験は京大生研研究所マイクロ波エネルギー伝送実験装置 METLAB を用いて行われた。

（平成 19 年 11 月 8 日受付，平成 20 年 4 月 30 日再受付）

- (1) 吉岡完治・菅 幹雄・野村浩二・朝倉啓一郎:「宇宙太陽発電衛星のCO₂ 負荷」, 学振未来 WG2-1, 19 (1998)
- (2) W.C. Brown: "The history of power transmission by radio waves", *IEEE Trans. MTT*, Vol.32, No.9, pp.1230-1242 (1984)
- (3) P.E. Glaser: "Power from the Sun; Its Future", *Science*, No.162, pp.857-886 (1968)
- (4) DOE and NASA Report: "Satellite Power System; Concept Development and Evaluation Program", Reference System Report (1979)
- (5) H. Matsumoto: "Research on Solar Power Station and Microwave Power Transmission in Japan: Review and Perspectives", *IEEE Microwave Magazine*, No.12, pp.36-45 (2002)
- (6) 藤田辰人・吉田裕之・鈴木拓明・木皿且人・久田安正・森 雅裕:「JAXA における宇宙エネルギー利用システム (SSPS) 研究の現状」, 信学技報, SPS2007-01 (2007-04), pp.7-10 (2007)
- (7) 三原莊一郎・齊藤 孝・小林裕太郎・金井 宏:「SSPS に関する USEF の活動状況 (2006)」, 信学技報, SPS2007-01 (2007-04), pp.1-6 (2007)
- (8) J.C. Mankins: "A fresh look at the concept of space solar power", *Proc. of 3rd Int. Conf. on Solar Power from Space—SPS'97*, S7041 (1997)
- (9) L. Summerer and F. Ongaro: "Solar Power from Space—Validation of Options for Europe", *Proc. of 4th Int. Conf. on Solar Power from Space—SPS'04*, pp.17-26 (2004)
- (10) D.H. Meadows, D.L. Meadows, J. Randers, and W.W. Behrens, III: The limits to growth—A report for THE CLUB OF ROME'S project on the predicament of mankind, Universe Books, New York (1972)
- (11) Y. Yamagiwa and M. Nagatomo: "An Evaluation Model of Solar Power Satellites Using World Dynamics Simulation", *Space Power*, Vol.11, No.2, pp.121-131 (1992)
- (12) (株) 三菱総合研究所:平成 16 年度宇宙航空研究開発機構委託業務成果報告書「宇宙エネルギー利用システム総合研究」(2005)
- (13) E. Brookner: "Phased Arrays and Radars—Past, Present and Future", *Microwave Journal, Cover Feature*, No.1 (2006)
- (14) (財) 国際衛星通信協会, 衛星通信研究, No.71, pp.19-43
- (15) T. Mitani, N. Shinohara, H. Matsumoto, and K. Hashimoto: "Improvement of Spurious Noises Generated from Magnetrons Driven by DC Power Supply after Turning off Filament Current", *IEICE Trans. Electron*, Vol.E86-C, No.8, pp.1556-1563 (2003)
- (16) 三谷友彦・篠原真毅・松本 紘・相賀正幸・桑原なぎさ・半田貴典:「電子レンジ用マグネトロンから発生するノイズの時間解析」, 信学論 C, Vol.J87-C, No.12, pp.1146-1154 (2004)
- (17) 篠原真毅・三谷友彦・松本 紘:「位相制御型マグネトロンの開発研究」, 信学論 C, Vol.J84-C, No.3, pp.199-206 (2001)
- (18) R. Adler: "A Study of Locking Phenomena in Oscillators", *Proc. of I.R.E and Waves and Electrons*, Vol.34, pp.351-357 (1946)
- (19) N. Shinohara, H. Matsumoto, and K. Hashimoto: "Phase-Controlled Magnetron Development for SPORTS: Space Power Radio Transmission System", *The Radio Science Bulletin*, No.310, pp.29-35 (2004)
- (20) N. Shinohara and H. Matsumoto: "Phased Array Technology with Phase and Amplitude Controlled Magnetron for Microwave Power Transmission",

Proc. of 4th Int. Conf. on Solar Power from Space—SPS'04, pp.117-124 (2004)

- (21) R.A. York and T. Itoh: "Injection- and Phase-Locking Techniques for Beam Control", *IEEE Trans. MTT*, Vol.46, No.11, pp.1920-1929 (1998)
- (22) K.D. Stephan and W.A. Morgan: "Analysis of interinjection-locked oscillators for integrated phased arrays", *IEEE Trans. AP*, Vol.35, pp.771-781 (1987)

篠原真毅 (正員) 1968 生。1991 年京都大学工学部電子工

学科卒業。1993 年京都大学大学院工学研究科修士課程修了。1996 年同大学大学院工学研究科博士課程修了。同年同大学超高層電波研究センター助手, 2000 年同センターの改組により宙空電波科学研究センター助手, 2001 年同センター助教授, 2004 年同センターの改組により生存圏研究所助(准)教授となり, 現在に至る。主として宇宙太陽発電所とマイクロ波エネルギー伝送に関する研究に従事。工博。IEEE, URSI, 電子情報通信学会会員。

松本 紘 (非会員) 1942 年生。1965 年京都大学工学部電

子工学科卒業。1967 年京都大学大学院工学研究科修士課程修了。1977 年同大学超高層電波研究センター教授, 1992-1998 年まで同センター長。2000 年同センターの改組により宙空電波科学研究センター教授, 2002 年同センター長, 2004 年同センターの改組により生存圏研究所教授・所長, 2005 年京都大学理事・副学長となり, 現在に至る。京都大学名誉教授。宇宙航空研究開発機構客員教授。中国武漢大学客座教授。工博。専門はスペースプラズマ物理学, 宇宙電波工学, 宇宙エネルギー伝送。1975 年日本電磁気学会田中館賞, 1993, 1998 年 NASA Group Achievement Award, 1998 年アメリカ地球物理学学会 (JGR) フェロー, 1999 年情報通信月間推進協議会志田林三郎賞, 2002 年 IEEE フェロー, 2004 年英国王立天文学協会 RAS-Associate, 同年近畿情報通信協議会会長表彰, 2006 年 Russian Federation of Cosmonautics Gagarin Medal, 同年科学技術分野の文部科学大臣表彰科学技術賞受賞。地球電磁気・地球惑星圏学会評議員, 元会長。国際電波科学 (URSI) 元会長。アメリカ地球物理学学会会員。