

火星飛行探査機への無線電力供給を想定した フェーズドアレイ送電システムの研究

長濱 章仁[†] 三谷 友彦[†] 篠原 真毅[†] 辻 直樹[‡] 可成 理高[‡] 米本 浩一[‡]

[†] 京都大学生存圏研究所 〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄

[‡] 九州工業大学大学院 〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1番1号

E-mail: [†] nagahama@rish.kyoto-u.ac.jp

あらまし 本研究は火星飛行探査機への無線電力供給を想定したマイクロ波電力供給システムの開発を目標としている。ここではまず電力可変型位相制御マグネトロン (PVPCM) を用いたフェーズドアレイ式送電システムを提案する。次に PVPCM が探査機を追尾するのに十分な応答速度をもつことを示す。さらに我々は適切な電力可変幅をもった PVPCM を2台構築し、それらを用いたフェーズドアレイが動作することを確認した。加えて画像処理プログラムを用い、移動する対象を自動的に追尾した。

キーワード マグネトロン, フェーズドアレイ, 位相同期ループ

Study on a Phased Array Power Transmitting System for a Mars Observation Airplane

Akihito NAGAHAMA[†] Tomohiro MITANI[†] Naoki SHINOHARA[†]

Naoki TSUJI[‡] Yoshitaka KANARI[‡] and Koichi YONEMOTO[‡]

[†] Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University Gokasho, Uji-city, Kyoto, 611-0011, Japan

[‡] Kyushu Institute of Technology 1-1 Sensui-cho, Tobata-ku, Kitakyushu-city, Fukuoka, 804-8550, Japan

E-mail: [†] nagahama@rish.kyoto-u.ac.jp

Abstract The objective of the present study is to develop a microwave power transmitting system for a Mars observation airplane. We suggest a phased array antenna composed of "power-variable phase-controlled magnetrons (PVPCM)" for the transmitting system. We confirmed the PVPCM had proper response speed to chase the airplane. We constructed PVPCMs for a phased array antenna through designing an integrator for a phase locked loop in the PVPCM, and we realized a stable power variation of the PVPCM. We confirmed realization of a phased array antenna with PVPCMs and transmitting power control. Also we conducted experiments of automatic beam chase to a moving antenna automatically with an image processing program.

Keyword Magnetrons, Phased arrays, Phase locked loops

1. 序論

広域・安定な火星探査は、学術分野や将来における人類の火星利用のために必須である。火星地表付近を探査する手段として現在主流の自動車(ローバー)は、非常に速度が遅く地形によっては走行できない場所もある。そこでこれらの欠点を補う手段として図1に示すような飛行探査機が注目されている[1]。

火星大気密度は地球と比べ非常に低く、機体重量をできるだけ軽くする必要がある。従って、飛行機に搭載されるエネルギー源の重量は可能な限り小さい方が望ましい。

軽量化の方法として、無線電力伝送を用いて飛行機を駆動する方法が挙げられる。無線電力伝送により飛行機に電力を供給できれば、機体には電源のない状態、もしくは安定化のための最低限の電源しかない状態が実現できる。そこで本研究は、飛行探査機を広域・長時間に渡り安定して駆動できるマイクロ波無線電力供給システムを研究開発する。

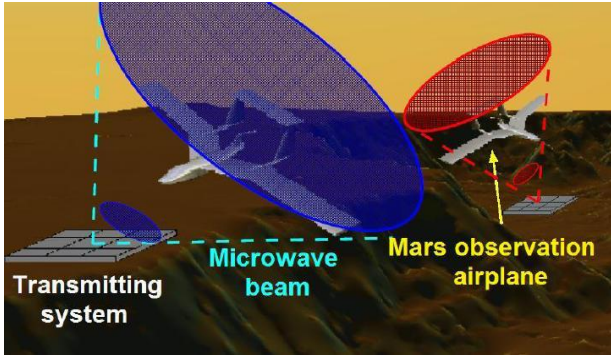


図 1, 探査システムのイメージ [1]

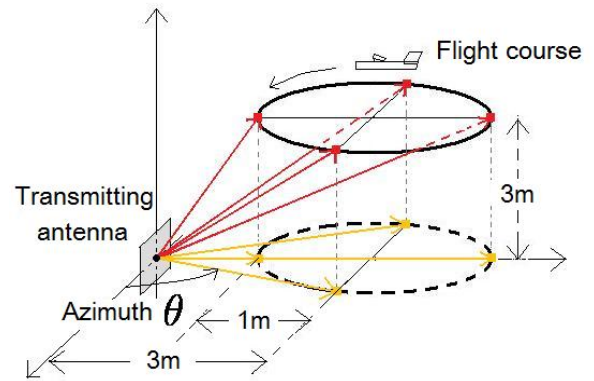


図 2 シミュレーションの概念図 [1]

2. 電力可変型位相制御マグネトロンを用いた送電システム

2.1. 送電システムの概要

送電システムは高出力・高効率である必要がある。火星飛行探査システムでは 10kW の送電電力と直径 7m 程度の送電アンテナが必要である。また安定な飛行を実現するためには飛行探査機を高速に追尾し、出力電力を変える必要がある。

以上を踏まえて我々は電力可変型位相制御マグネトロン (PVPCM) [2]を用いたフェーズドアレイ式送電システムを提案する。我々の研究グループでは過去に位相制御型マグネトロン (PCM) [3]や振幅位相制御型マグネトロン (PACM) [4]を開発してきた。しかし、PCM と PACM はマグネトロンの電源がフィードバックループに含まれており、出力電力が可変でなかったり、複雑なループ制御を必要とした。そこで我々はマグネトロンの電源をフィードバックループ外に置くことにより、出力電力が変えられる PVPCM を開発した。

PVPCM が飛行機を追尾するのに十分な応答速度をもっているか調べるため、飛行機の方向角変化とそれを追尾するマイクロ波ビームの方向角変化についてシミュレーションを行った。ここでは飛行機が図 2 に示すように定常円旋回しているものとする。飛行機を速度を 2.8m/s, PVPCM の位相安定までの時間を 0.07 秒とする。この条件は先に行われた地上実験を参考している。シミュレーションの結果を図 3 に示す。赤線が飛行機の方向角、紫の点がビームの方向角である。紫の点は赤線に沿っており、PVPCM の応答速度は十分であると言える。

また我々は送電システムに要求される電力可変幅についても考察を行った。方向角のシミュレーションと同様の条件を用いると、安定な電力を飛行機に供給するには最大送電電力と最小送電電力の比が 1.9 倍必要であることが分かった。

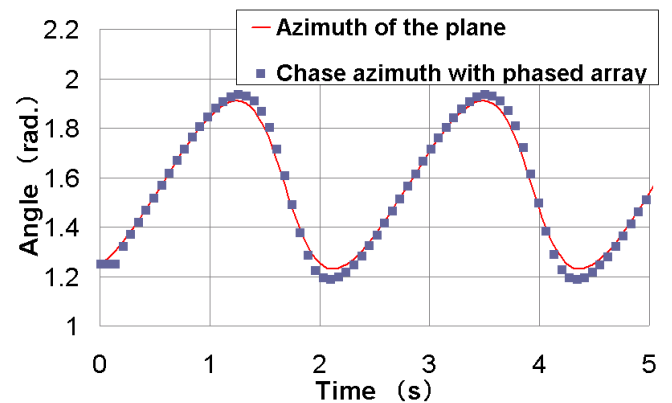


図 3 飛行機および送電ビームの方向角 [1]

2.2. 電力可変型位相制御マグネトロンの原理

PVPCM のブロック図を図 4 に示す。注入同期法によって PVPCM の出力周波数は注入信号に同期している。注入信号の周波数がマグネトロンの自走周波数に近い場合、マグネトロンの発振周波数は注入信号周波数に引き込まれる。なお注入信号はサーキュレータを介してマグネトロンに注入される。

また PVPCM は位相同期ループによって注入信号の位相と同じ位相で発振する。注入信号の位相を制御することにより PVPCM の出力位相を自由に変えることができる。ここで PVPCM の位相同期ループについて説明する。PVPCM の位相同期ループは図 4 の紫の線で囲まれた部分である。

θ_{in} を注入信号の位相、 θ_{out} を出力位相とする。これらの位相差はミキサで検知される。ミキサの出力電圧は LPF と制御回路を介して制御信号に変えられ、移相器 No.2 に入力される。移相器 No.2 はマグネトロンに入る信号の位相を調整し、位相同期がとられる。

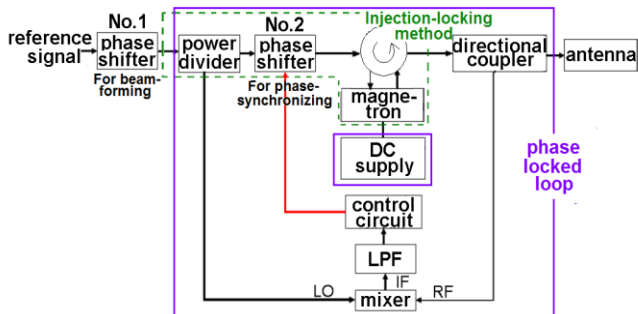


図 4 PVPCM のブロック図 [1]

位相同期ループのブロック線図を図 5 に示す．移相器の伝達関数は式(1)で表される．

$$F_p = \frac{K_p}{1 + sT_p} \quad (1)$$

式(2)で書かれる位相同期を実現するために，式(3)および式(4)で表される LPF と積分器を図 6 のように構成した．

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (\theta_s - \theta_{out}) = 0 \quad (2)$$

$$F_{LPF} = \frac{sC_{LPF}R_2 + 1}{sC_{LPF}(R_1 + R_2) + 1} \quad (3)$$

$$F_{int} = \frac{K_A}{s} \quad (4)$$

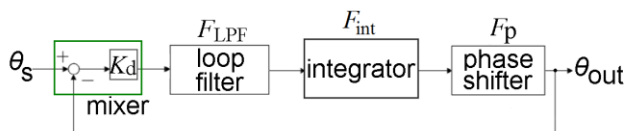


図 5 位相同期ループのブロック線図 [1]

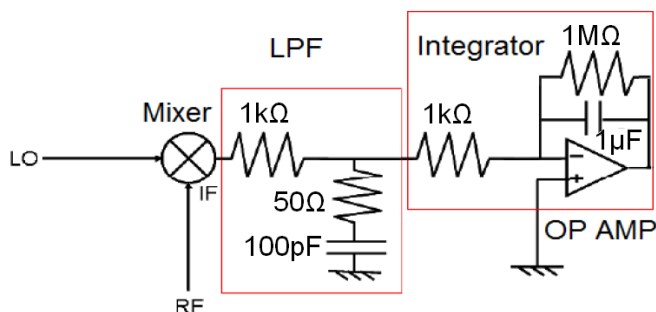


図 6 制御回路 [1]

PVPCM の出力電力は，出力周波数が注入信号に同期している限り可変である．この電力可変幅は注入信号電力に依存する．マグネトロン出力電力は直流電

源から供給されるマグネトロン陽極電流に依存する．マグネトロン出力位相は本来出力電力によって変化するが，PVPCM の直流電源は位相同期ループの外に置かれ，位相同期に影響を与えない．なお PVPCM の出力電力は約 800W であり，直流-マイクロ波変換効率は 70% 程度である．

2.3. 電力可変型位相制御マグネトロン製作

フェーズドアレイに用いられるマグネトロン特性は可能な限り近いものが望ましい．フェーズドアレイアンテナに用いる PVPCM を作るために，まずマグネトロン単体で 6 つの出力電力対周波数特性を測定した．結果を図 7 に示す．マグネトロン III と VI は他のマグネトロン特性と大きく離れている．従ってこれらのマグネトロンはフェーズドアレイには用いないこととした．また，2.44700GHz，15dBm の信号を注入した状態で，同様に出力電力対周波数特性を測定したところ，マグネトロン I 以外は特性が近かった．最終的にマグネトロン II と V を用いてフェーズドアレイを構築することにした．

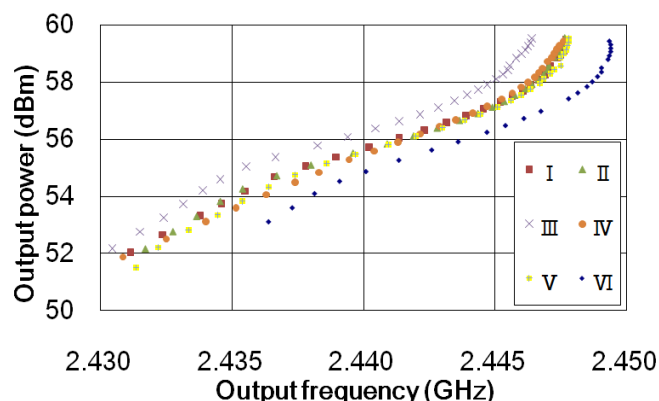


図 7 マグネトロン出力電力対周波数特性 [1]

制御回路について述べる．制御回路の回路定数は図 6 に示す通りである．本回路定数を用いて位相同期ループが実現できた．

2.2 節で述べた通り，電力可変幅は注入電力の関数である．しかし電力可変幅は出力位相の関数でもある．なぜなら，移相器の通過減衰量はその移相量に依存するからである．本 PVPCM で用いた移相器の通過減衰量はその移相量によって 0.5dB 程度変化する．そこで電力可変幅を安定化するために，注入電力をリミタによって均一化した．図 8 は移相器 No.1 の移相量を変化させたときの電力可変幅を表す．なお V_{cont} は移相量の制御電圧である．最小電力に対して 1.9 倍の最大電力を得ることができ，所望の電力可変幅を得た．

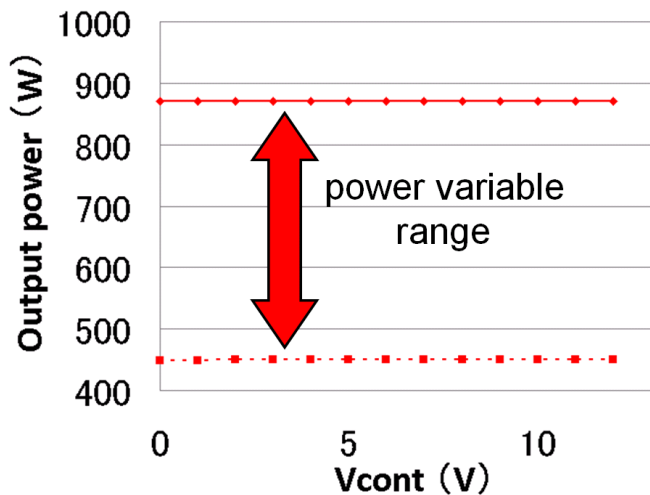


図 8 PVPCM の電力可変幅 [1]

3. 電力可変型位相制御マグネトロンを用いたフェーズドアレイアンテナの実験

3.1. 動作確認および電力制御の効果

PVPCM によるフェーズドアレイアンテナの動作を確認するため、まずビームパターンを測定した。2 台の PVPCM を設置し隣接素子間位相差を 0, 90, 270° と設定した。実験の概念図と写真を図 9 に示す。2.44575GHz, 61dBm のマイクロ波を出力し、x 軸上を移動するダイポールアンテナを用いてビームパターンを測った。距離による受電電力変動は計算にて考慮した。

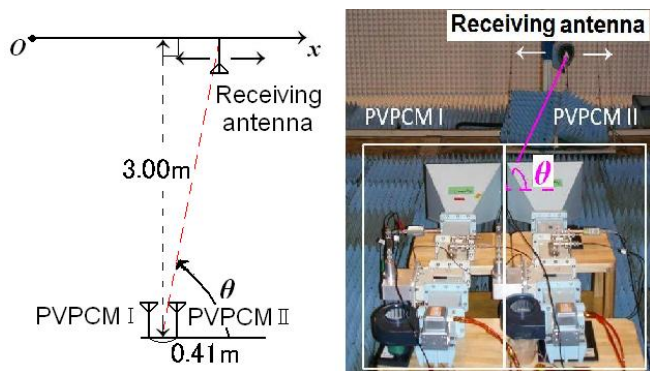


図 9 フェーズドアレイ実験の概念図と写真 [1]

測定結果を図 10 に示す。PVPCM を用いたフェーズドアレイアンテナがビーム方向を変えられることを確認した。しかし測定されたビーム方向と計算で得られた方向には差があった。隣接素子からの注入信号への影響の可能性がある。[5]

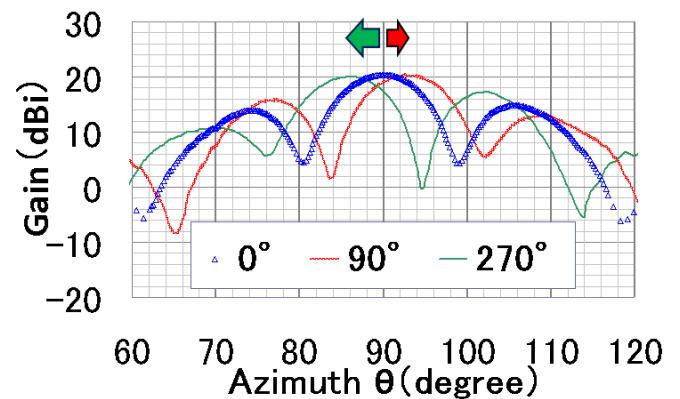


図 10 素子間位相差を変えた場合のビーム方向変化 [1]

また送電電力制御の効果についての測定も行った。受電ダイポールが図 9 のように x 軸に沿って移動する場合、一定の受電電力を実現するには送電電力 P_t が式 (5) のように制御される必要がある。

$$P_t = \frac{P_{th}}{\sin^2 \theta} \quad (P_{th}: \text{constant}). \quad (5)$$

送電電力制御をした場合としなかった場合についての受電電力を図 11 に示す。図 11 に示したデータは最大受電電力で規格化している。また図 11 からは送電アンテナの素子パターンの影響を除去している。図 11 より送電電力制御の効果が認められた。

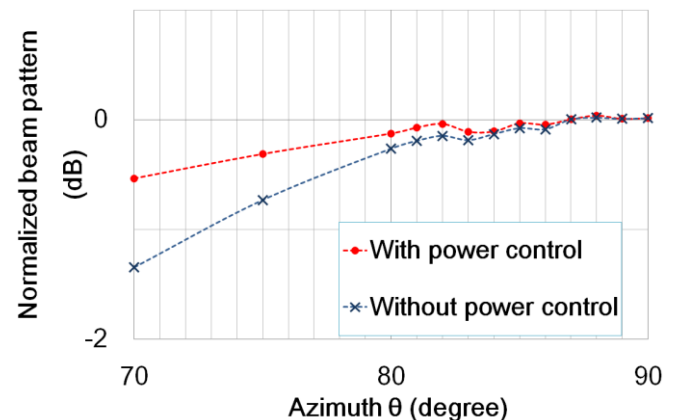


図 11 送電電力制御による受電電力変動の改善 [1]

3.2. 自動制御実験

製作した PVPCM2 台によるフェーズドアレイと、コンピュータによる画像処理プログラムを組み合わせ、x 軸上 1.7cm/s で移動するダイポールアンテナを自動的に追尾した。フェーズドアレイの制御方法を「パターン 1: 方向制御・電力制御なし」、「パターン 2: 方向制御あり・電力制御なし」、「パターン 3: 方向制御・電力制御あり」の 3 つとし、方向・電力制御の効果を

比較する。測定はそれぞれ3回行った。

結果を図12~14に示す。横軸はダイポールアンテナのx軸上の位置、縦軸はダイポールアンテナの受電電力である。なおこれら図12~14から送電アンテナの素子パターンの影響は除去していない。方向制御のない場合にはフェーズドアレイアンテナのビームパターンがそのまま表れている。方向制御を行った残りの2パターンについて、図12で見られたx=1600mmおよび2600mm付近に見られた受電電力の弱い部分にビームを振ることができ、受電電力が上昇している。

また、パターン1~3のそれぞれについて式(6)を用いて各測定点での受電電力 P_{ri} を最大受電電力 P_{rmax} で規格化し、平均した受電電力 P_{avr} を求めるとパターン1が-5.87dB、パターン2が-5.63dB、パターン3が-5.38dBとなり、方向制御の効果および送電電力制御の効果が得られたことが分かった。

$$P_{avr} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{P_{ri}}{P_{rmax}} \quad (6)$$

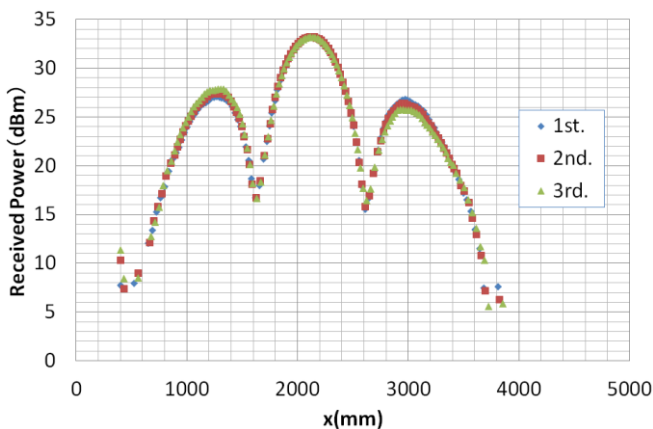


図12 方向制御・電力制御なし

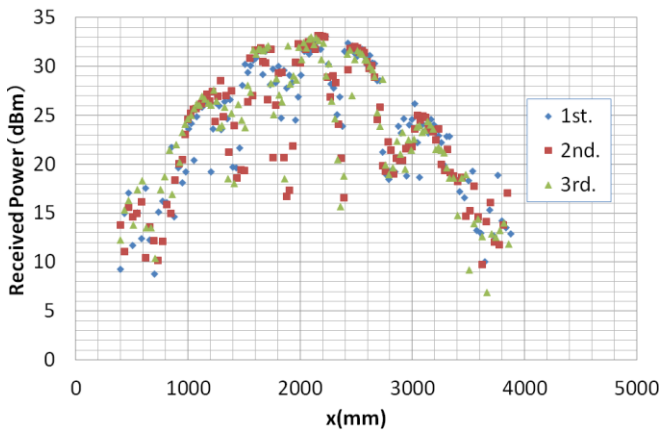


図13 方向制御あり・電力制御なし

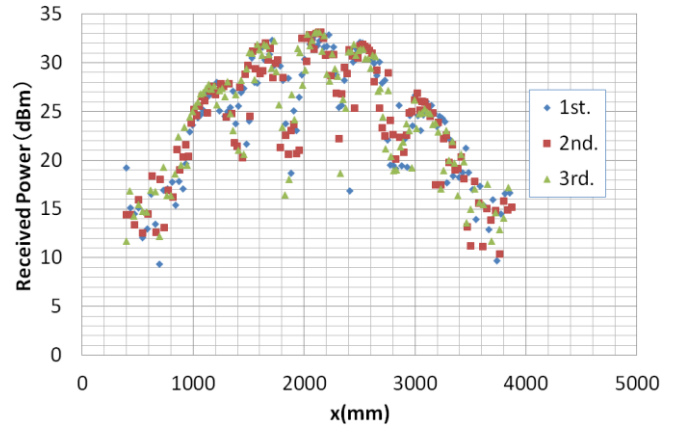


図14 方向制御・電力制御あり

4. 結論

PVPCMによるフェーズドアレイアンテナを用いた送電システムを提案した。またPVPCMが飛行機を追尾するのに十分な応答速度を持つことを確かめた。位相同期ループに用いる回路を設計し、適切な電力可変幅を持ったPVPCMを製作した。PVPCMを用いたフェーズドアレイを構築し、フェーズドアレイの動作および送電電力制御の効果を確認した。また画像処理プログラムで移動するアンテナを追尾し、方向・電力制御の効果を確認した。

文 献

- [1] A. Nagahama, T. Mitani, N. Shinohara, N. Tsuji, K. Fukuda, Y. Kanari and K. Yonemoto, "Study on a Microwave Power Transmitting System for Mars Observation Airplane", *IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Innovative Wireless Power Transmission: Technologies, Systems, and Applications (IMWS-IWPT), IWPT3-5, Proceedings* pp.63-66, Uji, Japan, May 12-13, 2011
- [2] 三谷友彦, 木村光利, 篠原真毅, "電力可変型位相制御マグネトロンの研究開発," 信学技報 ED2009-127, pp. 59-64, Oct. 2009.
- [3] N. Shinohara, H. Matsumoto, and K. Hashimoto, "Solar power station/ satellite (SPS) with phase controlled magnetrons," *IEICE Trans. Electron.*, Vol. E86-C, No. 8, pp. 1550-1555, August 2003.
- [4] N. Shinohara, T. Mitani, and H. Matsumoto, "Development of Phase and Amplitude Controlled Magnetron," *Proceedings of International Vacuum Electronics Conference (IVEC 2005)*, pp. 61-64, Noordwijk, the Netherlands, April 2005.
- [5] R. Adler, A Study of Locking Phenomena in Oscillators, *Proceedings of I.R.E and Waves and Electrons*, Vol. 34, pp. 351-357, 1946.