

## 火星飛行探査機へのマイクロ波無線電力供給システムにおける マグネトロンの電力制御に関する研究

長濱 章仁<sup>†</sup> 石清水 優<sup>†</sup> 三谷 友彦<sup>†</sup> 篠原 真毅<sup>†</sup> 米本 浩一<sup>‡</sup>

<sup>†</sup> 京都大学生存圏研究所 〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄

<sup>‡</sup> 九州工業大学工学研究院機械知能工学研究系宇宙工学部門 〒804-8550 福岡県北九州市戸畑区仙水町 1-1

E-mail: <sup>†</sup> {nagahama, iwashimizu, mitani, shino}@rish.kyoto-u.ac.jp, <sup>‡</sup> yonemoto@mech.kyutech.ac.jp

**あらまし** 火星飛行探査機へのマイクロ波無線電力供給システムに適した送電素子として電力制御型位相制御マグネトロン (PVPCM) が挙げられる。しかし PVPCM に対しステップ状の電力制御信号を加えた際に、出力スペクトルが乱れる現象が観測される。本研究は、PVPCM の構成要素である注入同期マグネトロンに対しステップ電力制御信号を加えることで、電力制御時に見られる周波数同期はずれの原因がマグネトロン出力位相の電力制御信号に対するオーバーシュート特性であることを明らかにした。また対策として注入電力の増強を行い、概ね周波数同期はずれを防止することができた。しかしながら電力制御の後、数 10ms に渡るマグネトロン出力位相の振動を観測し、その位相振動がアドラーの式で記述される周波数同期はずれではないことを示唆した。

**キーワード** マグネトロン, フェーズドアレイ

## Study on Power Control of a Magnetron for a Microwave Power Transmission System for a Mars Observation Airplane

Akihito NAGAHAMA<sup>†</sup> Masashi IWASHIMIZU<sup>†</sup> Tomohiko MITANI<sup>†</sup>

Naoki SHINOHARA<sup>†</sup> and Koichi YONEMOTO<sup>‡</sup>

<sup>†</sup> Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University Gokasho, Uji-shi, Kyoto, 611-0011 Japan

<sup>‡</sup> Space Engineering Section, Department of Mechanical and Control Engineering, Faculty of Engineering, Kyushu Institute of Technology 1-1 Sensui, Tobata, Kitakyushu, 804-8550 Japan

E-mail: <sup>†</sup> {nagahama, iwashimizu, mitani, shino}@rish.kyoto-u.ac.jp, <sup>‡</sup> yonemoto@mech.kyutech.ac.jp

**Abstract** A Power-variable Phase-controlled Magnetron (PVPCM) is a suitable microwave source for a power transmission system for a Mars observation airplane. Frequency asynchronous phenomena are observed when step-wise power control signals are input into the PVPCM. Investigating an injected magnetron, we revealed that frequency asynchronous phenomena were caused by an overshoot characteristic of the magnetron output-phase toward the power control signal. The injected power was increased as a countermeasure, and most of frequency asynchronous phenomena under step-wise power control were suppressed. However, spikes of the input-output phase difference of the magnetron were still observed. We also revealed that these spikes could not be discussed with Adler's equation.

**Keyword** Magnetrons, Phased arrays

# 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システムが注目されている。火星大気密度は地球の約0.75%と非常に低く、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。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、大幅な軽量化が期待できる。

本研究はこれまで高速移動する飛行探査機への安定的な常時無線給電を目指して、電力可変型位相制御マグネトロン (PVPCM) を用いた電力可変のフェーズドアレイによる送電を提案してきた[1]。PVPCM の構成を図2に示す。参照信号への周波数同期、PLLを用いた位相制御、およびマグネトロン陽極電流制御によって、電力可変のフェーズドアレイが実現された[1]。

しかしながら PVPCM に対しステップ状の電力制御を行った際に、出力スペクトルが乱れる現象が観測された。今後飛行探査機への無線電力供給システムでは図3に示す受電電圧制御ループのようなデジタル送電電力制御が行われる。受電電圧制御ループは探査機上の受電電圧情報を基に送電システムがデジタル制御でその送電電力を調整し、受電電圧を一定に保つ制御ループであり、飛行探査機への安定電力供給に寄与する。本稿では送電システムのデジタル電力制御に向けて、スペクトル乱れの原因および対策について検討を行う。

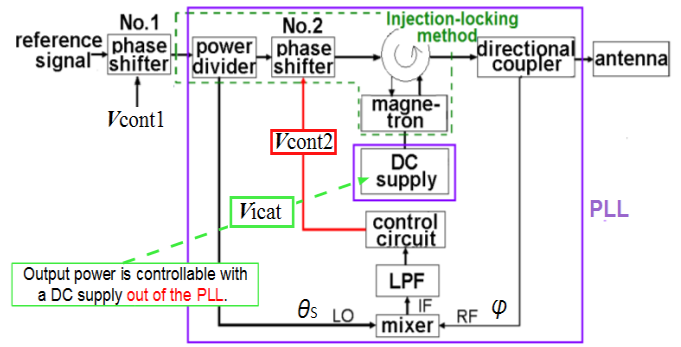


図2 PVPCM の構成

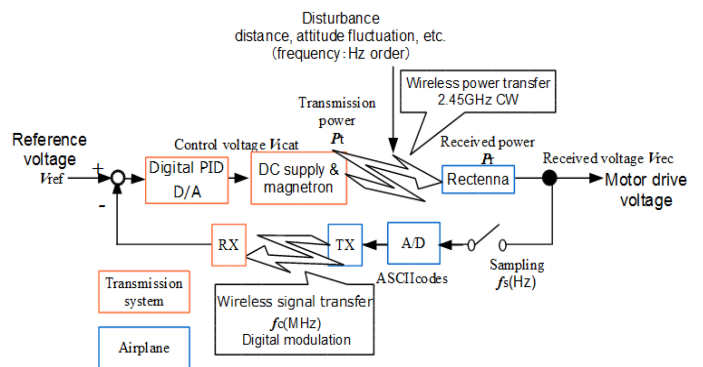


図3 探査機受電電圧制御ループのブロック線図

## 2. 注入同期マグネトロンのステップ電力制御下における周波数同期はずれ

PVPCM は内部に注入同期マグネトロンをもち、その出力スペクトルは通常図4の左図に示すような単一スペクトルから構成される。しかし、PVPCM に対してステップ状の電力制御信号を加えた場合、図4の右図に示すようなスペクトルの乱れが発生する。これは準静的に電力制御を行った場合には発生しない現象であり、注入同期マグネトロンの周波数同期外れが原因だと考えられる。周波数同期はずれは PVPCM フェーズドアレイのビームフォーミングに悪影響を与えるため、対策が必要である。なおこの周波数同期はずれは注入同期マグネトロン単体に対してステップ電力制御を行った場合にも発生するため、本稿では注入同期マグネトロン単体における原因究明を行った。

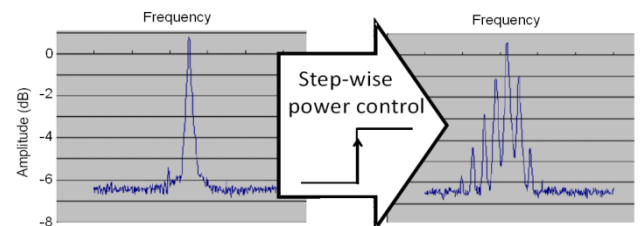


図4 PVPCM の出力スペクトル

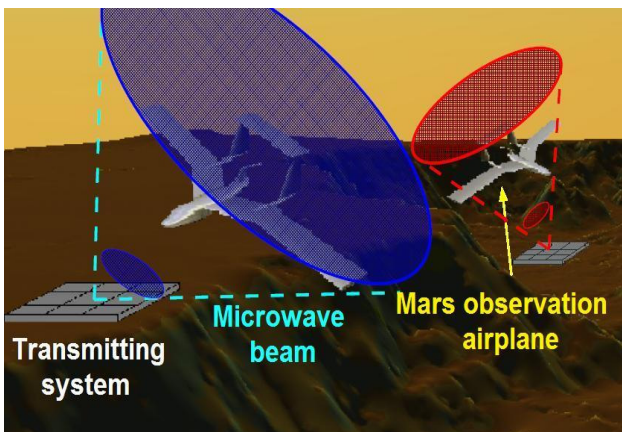


図1 火星飛行探査システムのイメージ

## 2.1. 周波数同期はずれの原因

マグネトロンは図5に示すように自走角周波数 $\omega_0$ をもつ。 $\omega_0$ は周波数プッシングにより陽極電流制御電圧、すなわち電力制御電圧 $V_{icat}$ の関数である[2]。図6にその関係を示す。なお図6は定常状態での関係を表す。注入同期下では図5に示す通り、マグネトロンに注入信号が注入され角周波数 $\omega$ 、位相 $\phi$ 、電力 $P_0$ の信号が出力される。

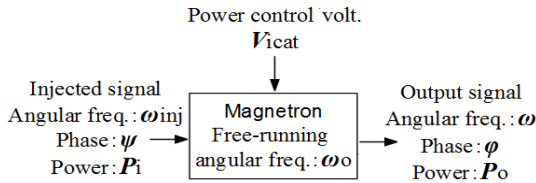


図5 注入信号と出力信号の定義

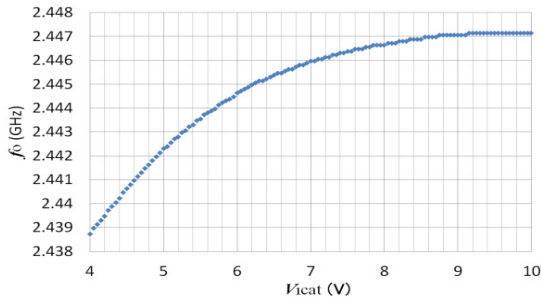


図6 電力制御電圧 $V_{icat}$ と定常自走周波数 $f_0$ の関係

入出力位相差を $\alpha = \phi - \psi$ 、 $Q_{ext}$ をマグネトロンの外部 $Q$ 値として、 $k = 1/Q_{ext}\sqrt{P_i/P_0}$ と定義すると、アドラーの式(1)が成立する[3]。

$$\frac{d\alpha}{dt} = \omega_0 - \omega_{inj} - \omega_0 k \sin \alpha \quad (1)$$

$t_0$ をある有限な時間とする。周波数同期とは $\omega$ が $\omega_{inj}$ に等しくなることであり、すなわち $d\alpha(t_0)/dt = 0$ となることである。周波数同期がとれる条件は式(2)のように表される。式(1)、式(2)および図6より周波数同期を保つことができる $V_{icat}$ の範囲が存在することがわかる。

$$|\alpha| < \frac{\pi}{2} \quad (2)$$

注入同期下におけるマグネトロンの出力位相 $\phi$ は注入位相 $\psi$ に影響されると同時に式(1)より電力制御信号 $V_{icat}$ にも影響される。従って、注入同期マグネトロンのブロック線図は図7のようになる。

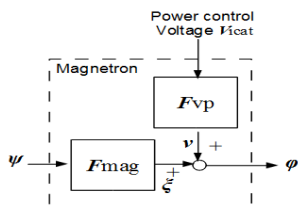


図7 注入同期マグネトロンのブロック線図

注入位相 $\psi$ を一定に保ちステップ電力制御を注入同期マグネトロンに加えた場合の $\alpha$ の応答を図8に示す。これはすなわち図7における $F_{vp}$ の応答である。 $\alpha$ が定常値に対してオーバーシュートしている様子が見える。

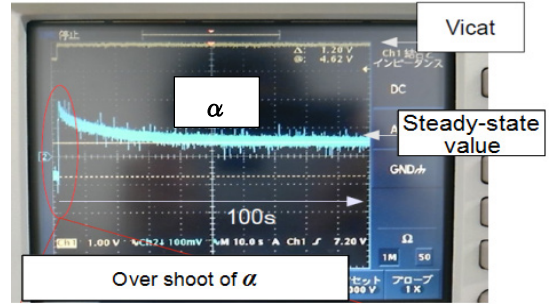


図8 ステップ状 $V_{icat}$ に対する $\alpha$ の応答

図8より、ステップ電力制御を行った際には準静的に電力制御を行った際に比べて過渡的に $\alpha$ が大きく振れることがわかる。これはすなわち、たとえ準静的に電力制御を行った場合に周波数同期条件(2)を満たす $V_{icat}$ の範囲であっても、ステップ状の $V_{icat}$ を加えた場合には式(2)を満たさなくなることを示す。

以上の考察より準静的な電力制御時に見られなかった周波数同期はずれは、 $\alpha$ の $V_{icat}$ に対するオーバーシュート特性によるものであるといえる。

## 2.2. 注入電力増強によるマグネトロン入出力位相差抑制実験

式(1)より注入電力 $P_i$ を $A$ 倍した場合の $\alpha$ の定常値 $\alpha'_{t_0}$ は、元の $\alpha$ の定常値を $\alpha_{t_0}$ として式(3)のように表される。

$$\frac{\sin \alpha'_{t_0}}{\sin \alpha_{t_0}} = \sqrt{A} \quad (3)$$

式(3)より注入電力を大きくすれば $\alpha$ の大きさを抑制できることが想定される。 $P_i = 29.1 \text{ dBm}, 36.1 \text{ dBm}$ とした場合の各自走周波数に対する $\alpha$ の定常値を図9に示す。また赤四角形は式(3)と $P_i = 36.1 \text{ dBm}$ のデータを用いて $P_i = 29.1 \text{ dBm}$ での $\alpha$ を推定したものであり、実測とよく一致している。従って確かに式(3)は成立し電力増強による $\alpha$ 抑制が可能であるといえる。

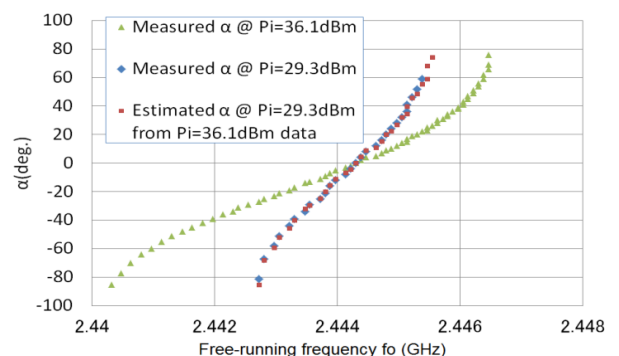


図9 各注入電力における $\alpha$

$P_i = 33.9 \text{ dBm}$ においては $V_{\text{icat}} = 4.76 \text{ V}$ から $V_{\text{icat}} = 7.14 \text{ V}$ の範囲で周波数同期はずれなく準静的に電力制御が可能である。式(3)と図8でのオーバーシュート量より $A > 3.24 \text{ dB}$ とすれば $V_{\text{icat}} = 4.76 \text{ V} \sim 7.14 \text{ V}$ の範囲でステップ電力制御が可能であると想定される。図10に示す構成で $A = 6.0 \text{ dB}$ とし、マグネトロンに対して $V_{\text{icat}}$ が $4.76 \text{ V}$ および $7.14 \text{ V}$ の2値でステップ変化する電力制御信号を加え、周波数同期はずれが発生するか否かを確認した。マグネトロンの入出力信号をミキサで比較しているため、周波数同期はずれが発生した場合にはIF電圧に振動が観測される。図11に観測波形を示す。

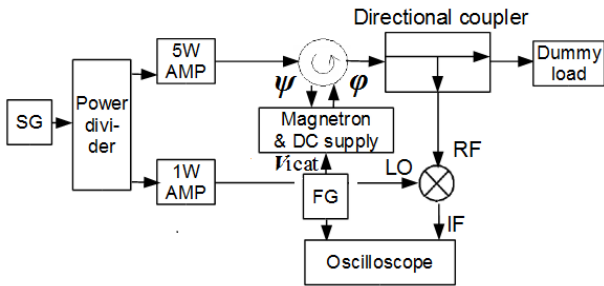


図10 各注入電力における $\alpha$

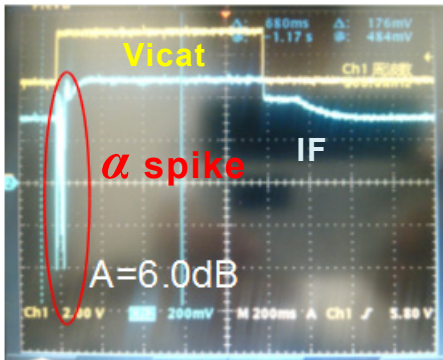


図11 ステップ電力制御信号とIF電圧

IF電圧は観測領域で概ね直流であり、注入電力増強によって周波数同期はずれをほぼ抑えられている。しかし、 $V_{\text{icat}}$ を上昇させた時に数10msのIF電圧の振動が観測されている。マグネトロン出力周波数の振動はフェーズドアレイのビームフォーミングや、受電電圧制御ループに悪影響をおよぼす可能性があるため、さらなる考察を行った。

### 2.3. ステップ電力制御時の注入位相差の観測

2.2節で観測されたIF信号の振動をネットワークアナライザを用いて観測した。構成を図12に示す。ネットワークアナライザのport1を注入信号源としport2にマグネトロン出力を入力することで、入出力位相差 $\alpha$ を直接観測することができる。図13に観測結果を示す。図13はステップ電力制御時の $\alpha$ の振動を拡大したものである。観測結果より、 $\alpha$ の振動部分は微分不可能

な波形であり、アドラーの式(1)では取り扱うことができないといえる。また式(2)で書かれる同期条件を満たす場所で振動が発生していることから、アドラーの式が記述する周波数同期現象からの外れではない可能性がある。 $\alpha$ の振動を引き起こす原因として例えば、自走周波数がステップ電力制御時に自走角周波数 $\omega_0$ が振動している可能性が挙げられ、検討が必要である。

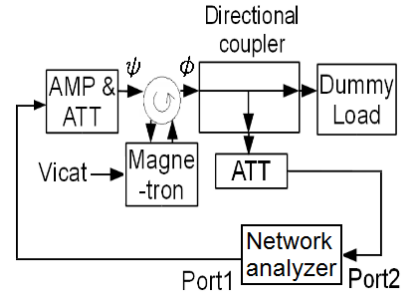


図12 ネットワークアナライザによる $\alpha$ 観測

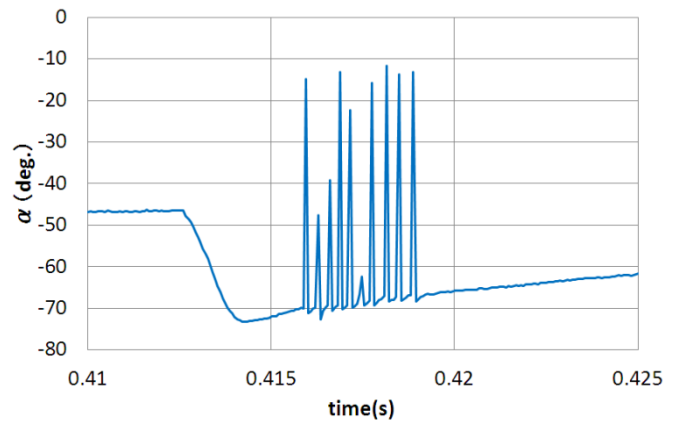


図13  $\alpha$ の振動観測波形

### 3. 結論

本稿では、注入同期マグネトロンのステップ電力制御に対する挙動を考察した。電力制御時に見られる周波数同期はずれは、マグネトロン出力位相の電力制御信号に対するオーバーシュート特性が原因であることがわかった。注入電力の増強により概ね周波数同期はずれを防止することができたが、電力制御時に起こる数10msの出力位相振動の原因については、マグネトロン単体の電力制御信号に対する挙動を調べる必要がある。

### 文 献

- [1] Akihito Nagahama et al., "Auto Tracking and Power Control Experiments of Magnetron-based Phased Array Power Transmitting system for a Mars Observation Airplane," Proc. MWS-IWPT2012, pp. 29-32, Kyoto, Japan, May 2012.
- [2] H. W. Welch, "Prediction of traveling wave magnetron frequency characteristics: Frequency pushing and voltage turning," Proc. IRE, vol. 41, pp. 1631-1653, 1953
- [3] Robert Adler, "A Study of Locking Phenomena in Oscillators," Proc. IRE, vol. 34, pp. 351-357, 1946.