

5.8 GHz帯人工衛星内部ワイヤレスシステム整流回路に関する研究[†]

Study on 5.8 GHz band rectifying circuit for the inside wireless system of satellite

王 策^{*1‡}・篠原 真毅^{*2}・三谷 友彦^{*3}

Ce WANG and Naoki SHINOHARA and Tomohiko MITANI

人工衛星の重量を低減するため、人工衛星内部ワイヤレスシステムが先行研究で提案された。そのシステムは人工衛星の各サブシステムに無線通信モジュールを搭載し、通信ワイヤを無線化するシステムである。本研究では、我々はマイクロ波無線電力伝送技術を用いた完全なる人工衛星内部ワイヤレスシステムを提案した。設計要求に応じて高変換効率と低変換損失の整流回路を設計した。回路シミュレーションでは、変換効率は最適入力に78%になり、実測71%になった。出力電圧は最適負荷1300Ωに置いて5V以上出力できる。

To reduce the weight of a satellite, an internal wireless system for satellites was proposed in a previous study. It is a system that can communicate between the subsystems by wireless communication modules. In this paper, we propose a complete internal wireless system using microwave wireless power transmission technology and present the design of a high efficiency rectifier circuit-based charge pump circuit. The conversion efficiency increases to 78% at 30 mW in the simulation, and was about 71% in the experiment. The output voltage is higher than 5 V at an optimum load of 1300 Ω.

Keywords : Charge pump, Circuit simulation, Harmonic filters, Schottky diodes, Rectennas, Wireless power transmission, Microwave circuits.

1. 序論

将来の宇宙開発の実現には、宇宙観測や科学実験衛星を打ち上げることが不可欠である。しかしながら、ロケット搭載能力の限界があるために、人工衛星の軽量化は重要な課題とされている。人工衛星軽量化の実現のために、衛星用の内部無線システム(IWS)が提案された。通常人工衛星のワイヤには信号線と電源線の2種類が存在し、それらを全て除去した場合、重量は20%から30%に削減

することができる。また、この時ワイヤによる制限なく、サブシステムを設計できる利点も存在する。衛星運転中には、そのサブシステムが互いに独立しているため、IWSを用いた人工衛星の安定性も高めることができる。

先行研究では、各サブシステムに無線通信デバイスを導入することによって信号線が削減されたが¹⁾本研究では、マイクロ波無線電力伝送技術を用いた完全IWSシステムを提案した²⁻⁷⁾。我々の提案するIWSは、サブシステム間の内部無線通信システムとワイヤレス電源システムが同時に実行できるシステムである。このIWSシステムを第1図に示す。

† 第1回宇宙太陽発電シンポジウム, 2015年12月15-16日, 東京にて発表

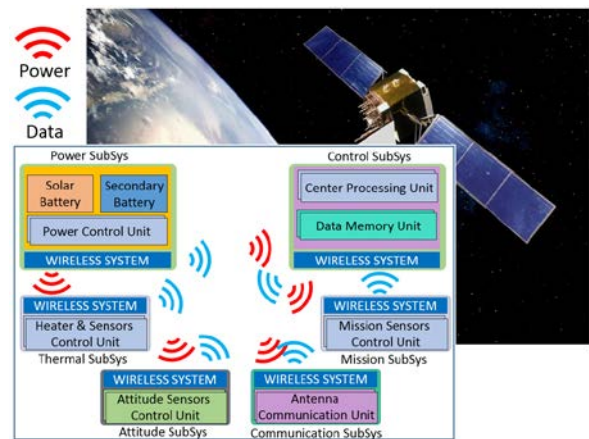
‡ Corresponding author: Ce Wang.
E-mail: ce_wang@rsh.kyoto-u.ac.jp

*¹ 京都大学 生存圏研究所
〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄京大生生存圏研究所宇治地区
研究所本館S棟 S-344H 篠原研究室
Shinohara Labs., Research Institute for Sustainable Humansphere,
Uzi Campus Kyoto university, Gokasyo, Uji City, Kyoto 611-0011,
Japan

*² 京都大学 生存圏研究所
〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄京大生生存圏研究所宇治地区
研究所本館S棟 S-344H 篠原研究室
Shinohara Labs., Research Institute for Sustainable Humansphere,
Uzi Campus Kyoto university, Gokasyo, Uji City, Kyoto 611-0011,
Japan

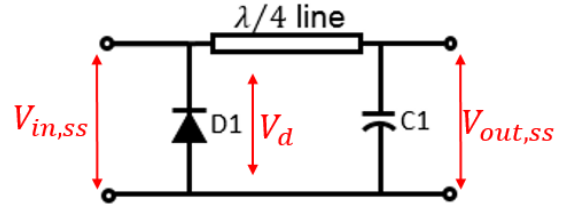
*³ 京都大学 生存圏研究所
〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄京大生生存圏研究所宇治地区
研究所本館S棟 S-344H 篠原研究室
Shinohara Labs., Research Institute for Sustainable Humansphere,
Uzi Campus Kyoto university, Gokasyo, Uji City, Kyoto 611-0011,
Japan

©SSPSS



第1図 人工衛星内部ワイヤレスシステムブロック図

人工衛星の充電時間は軌道周回毎に制限されるため、衛星電力の節約は重要な課題である。このシステムでは、5.8GHz 帯で動作するチャージポンプ整流回路を使用する。本研究では、変換効率が高く、変換損失が最小です。1段チャージポンプ整流回路にF級負荷を導入した。また、このチャージポンプ整流回路とシャント整流器の変換効率を理論的に比較し、その結果を実験的に検証した。IWSシステム仕様の定義は第1表に示す⁸⁾。



第2図 シングルシャント整流回路図

第1表 IWS システム仕様

Items	Contents
Frequency	5.8 GHz
Input power	10-30 mW
Output power	~ 5V
Load resistance	~ 1000 Ω
Diode	HSMS2860
Capacitor	GRM155R71H104

2. 変換効率

2.1 変換効率の計算 整流器回路が整流動作を実行しているとき、回路の全体的な損失は使用している電子素子および伝送線路によって生成される。変換効率は理論変換率 100% と伝送線路損失、素子損失、反射成分の差で表すことができる。整流回路の変換効率 η は次のように示せる。

$$\eta = 100\% - Loss_{trl} - Loss_{elm} - Ref \quad (1)$$

ここで、 $Loss_{trl}$ は伝送線路損失、 $Loss_{elm}$ は回路素子損失、 Ref は回路の反射成分である。この回路が整合条件にあるとき、反射成分はほぼ 0% である。さらに、 $Loss_{trl}$ は数パーセントであり、十分小さい値であるため、それを無視できる。そして、1段チャージポンプ回路には、2つのダイオードと2つのコンデンサによって構成される。整流回路では、大部の損失は整流ダイオードによって生成され、したがって、式1は以下のように近似できる。

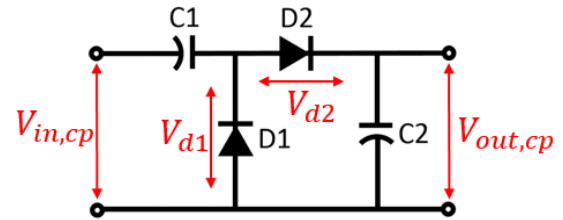
$$\eta = 100\% - Loss_{dio} \quad (2)$$

ここでは、 $Loss_{dio}$ はダイオードの損失です。ある周期に T わたって、ダイオードによって生成される損失は以下のように表すことができる。ここで、 V はダイオードの印加電圧であり、 I はダイオードの電流である。

$$Loss_{dio} = \frac{1}{T} \int_0^T V I d\theta \quad (3)$$

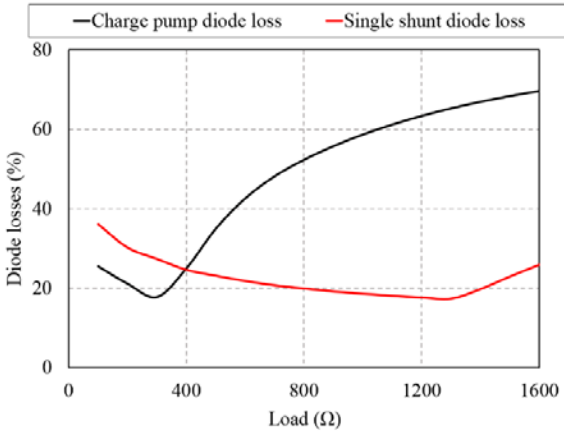
2.2 シングルシャント整流回路 本節では、シングルシャント整流回路におけるダイオードの印加電圧と電流について検討した。第2図はシングルシャント整流回路のダイオードの入力電圧、出力電圧、および印加電圧を示している。電圧 $V_{in,ss}$ と $V_{out,ss}$ はそれぞれ入力電圧と出力電圧であり、 V_d はダイオード電圧を表す。第2図は、 V_d が $V_{in,ss}$ 、 $V_{out,ss}$ と等しいことを示している。この場合、ダイオード電流成分は $I_{d,ss}$ であると仮定できる。従って、シングルシャント整流回路におけるダイオードの損失は式(3)によって計算できる。

2.3 チャージポンプ整流回路 本節では、チャージポンプ回路のダイオードの電圧と電流の成分を解析する。第3図は、ダイオードの入力電圧、出力電圧、および印加電圧を示している。この回路の RF 入力端子の電圧がグランドより低いと、ダイオード D1 により RF 入力電圧のピーク値でコンデンサ C1 が充電され、第3図に示すように出力端子でコンデンサ C2 が放電する。逆に RF 入力端子電圧が高いとき、充電されたコンデンサ C1 は入力電圧と直列であり、ダイオード D2 はコンデンサ C2 を充電する。その結果、コンデンサ C2 の充電電圧は入力電圧ピーク値の2倍になり、したがって、平滑コンデンサとして機能する。電圧 $V_{in,cp}$ と $V_{out,cp}$ はそれぞれ1段チャージポンプ回路の入力電圧と出力電圧を表している。ダイオードそれぞれの印加電圧は V_{d1} と V_{d2} である。ダイオードの印加電圧は理論と同様であるため、出力電圧 $V_{out,cp}$ の値は入力電圧 $V_{in,cp}$ の2倍である。さらに、 V_{d1} と V_{d2} は同じである。したがって、 V_{d1} と V_{d2} は $V_{in,cp}$ に等しく、 $V_{out,cp}$ の半分である。この場合、ダイオードの電流成分は $I_{d,cp}$ であると仮定できる。



第3図 チャージポンプ整流回路図

2.4 シングルシャントとチャージポンプ整流回路の比較 同じ整合条件では、 $V_{in,ss}$ と $V_{in,cp}$ が等しく、 V_d は V_{d1} と V_{d2} 同様である。また、同じ入力電力条件ではチャージポンプ回路のダイオードの電流が、シングルシャント回路のダイオードの電流の半分になると推論することができる。式(3)によれば、チャージポンプ回路とシングルシャント回路のダイオードの損失を同じであるので、それらは同じ変換効率を有すると結論付けることができる。第4図はシミュレーションされたチャージポンプ回路とシングルシャント回路のダイオード損失を示している。上記の理論によって、ダイオードによる生成した損失が変わらず、総合ダイオード損失はダイオードの数と関係ないと推論することができる。多段チャージポンプ回路を使用しても良好な効率を得ることができる。本研究では、1段チャージポンプ回路の動作を検証するための実験を行った。



第4図 シングルシャント整流回路とチャージポンプ整流回路のダイオード損失

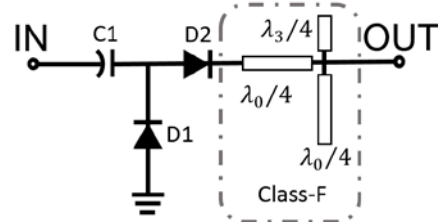
3. F 級負荷の導入

変換効率を向上させるために、理想的な F 級負荷が変換効率を 100% に向上させることができるため、従来のチャージポンプ回路には F 級負荷が導入されました⁹⁾。F 級負荷動作は高調波を抑制し、波形整形により半導体装置の消費電力低減ができる。したがって、電圧波形は基本周波数と奇数高調波からなる矩形波に整形される。この動作を実現するために、負荷インピーダンスは偶数高調波に対してはゼロ (短絡) に設定され、寄生素子の影響を含む奇数高調波に対しては無限 (開放) に設定される。換言すれば、電流成分は理想的な F 級負荷が導入されたことによって電圧成分と直交する¹⁰⁾。

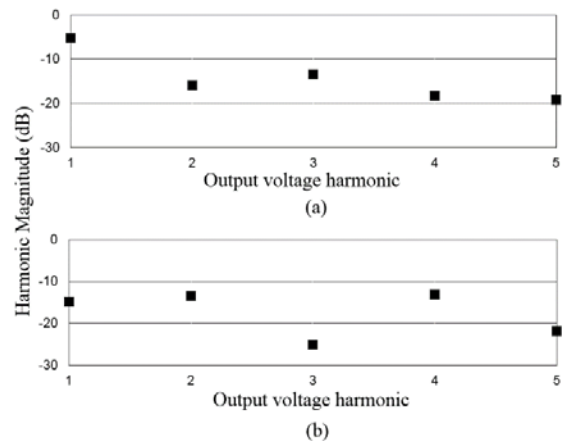
我々は三次高調波までの成分を抑制できる F 級負荷を設計した。それは固定長のマイクロストリップ線路とオープンエンドのスタブで構成されている。F 級負荷は出力波形をある程度の平滑化能力を持ち、したがって、チャージポンプ回路において平滑コンデンサを省略することができる。さらに、電子部品が削減されるので、回路損失も低減される。第 5 図は F 級負荷を導入したチャージポンプ整流回路を示す。チャージポンプダイオード D2 の後ろに第 4 図に示す F 級負荷を導入した。

第 6 図は F 級負荷を導入した整流回路と導入しない整流回路の電圧出力の高調波成分を示している。高調波成分とその整流回路の出力電圧の比を表している。通常のチャージポンプ整流回路は B 級整流しか使用していないため、それらを削減する能力がほとんどないので、比較的大きな高調波成分を漏れることは明らかである。第 5 図(a)から、基本波成分が直流成分の約半分が出力に出る。3 次と 5 次

高調波成分も F 級負荷を導入した整流回路より大きく出力端に漏れることは明らかである。



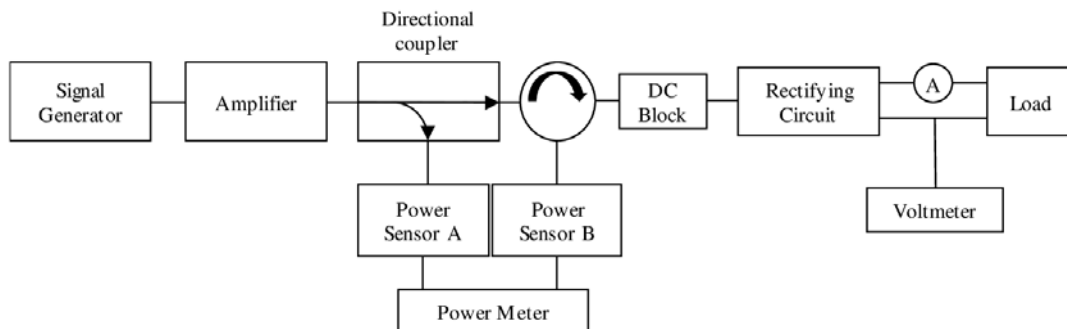
第 5 図 F 級負荷を導入したチャージポンプ整流回路



第 6 図 チャージポンプ整流回路出力電圧高調波成分 (a)F 級負荷を導入していないチャージポンプ整流回路 (b)F 級負荷を導入したチャージポンプ整流回路

4. 実験結果

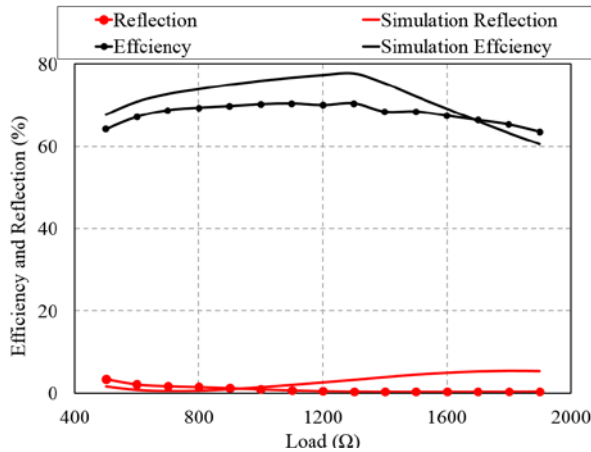
第 7 図は RF-dc 回路の実験方法ブロック図である。電力供給端は信号発生器から生成された 5.8-GHz の正弦波を使用した。パワーセンサ A は整流回路の入力電力を測定する。また、サーキュレータを介してパワーセンサ B は dc ブロックの入力点での反射電力を測定する。ここでは、直流電圧が整流回路を通過するのを防ぐために dc ブロックを使用する。



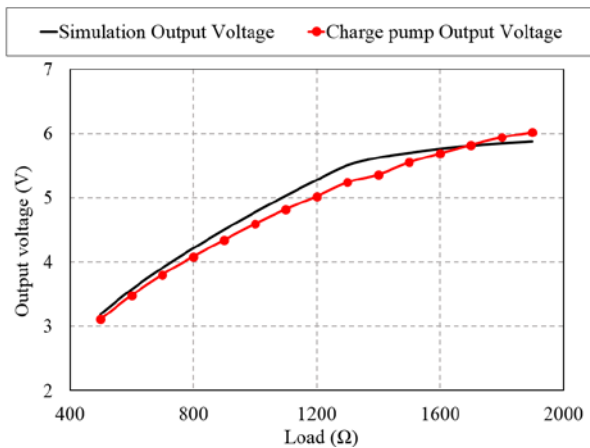
第 7 図 RF-dc 変換効率の測定実験ブロック図

これまでの研究結果を踏まえ、5.8 GHz のチャージポンプ整流回路を設計製作し、その性能を実測した。

5.8 GHz チャージポンプ回路の変換効率と反射率を第 8 図に示す。回路シミュレーションの計算では変換効率は 1300 Ω の最適負荷で約 77 % になり、F 級負荷を導入した一段チャージポンプ回路の実験的に測定された効率は最適負荷で約 71 % であり、シミュレーション結果と一致する。第 9 図はチャージポンプ回路の出力電圧を示し、最適負荷で 5 V 以上を出力できる。これは説明したシステム設計要件に準拠している。第 7 図の示す通りに、反射成分は最適負荷に置いて最小ではない。この理由は、チャージポンプ整流回路図により、入力部分にチャージコンデンサを使用する。このコンデンサの半田付けの位置に反射成分を大きく影響する。コンデンサの半田付け位置が線路の中央部ではないため、このような現象が起こった。本実験では、変換効率の計算は出力電圧とその負荷抵抗で計算した。入力 30mW、出力 5 V は明らかに電圧駆動型整流回路なので、電圧とその負荷抵抗で変換効率を計算するのは妥当だと考えられる。

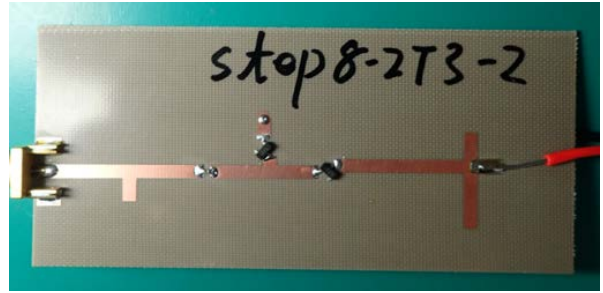


第 8 図 F 級負荷を導入したチャージポンプ整流回路の変換効率と反射率



第 9 図 F 級負荷を導入したチャージポンプ整流回路の出力電圧

第 10 図は実際の一段チャージポンプ整流回路の写真を示している。回路作成と実験条件に限られているため、この整流回路の設計精度は 0.1-mm であり、これは普段の高周波回路設計の精度の 10 分の 1 である。より良い条件でこの回路を設計して製造できるならば、変換効率は約 80% に致せると考えられる。今までの同じダイオードを用いたシングルシャント整流器回路の達成された最高の変換効率は約 80 % である¹¹⁾。したがって、この実験の結果はチャージポンプ整流回路とシングルシャント整流回路の変換効率が同じであることも示している。



第 10 図 F 級負荷を導入したチャージポンプ整流回路の写真

5. まとめ

本稿ではダイオード損失を考慮した高効率な人工衛星 IWS での利用を想定した 5.8 GHz 用チャージポンプ整流回路の動作理論と設計手法について述べた。理論解析からチャージポンプ整流回路とシングルシャント整流回路のダイオード損失が等しくなることを示した。製作した整流回路の測定を行った結果、変換効率は 71% となり、シミュレーション結果と一致することを示した。また、より高い精度で設計した整流回路を製作した場合、変換効率が 80% 程度まで到達できる可能性を述べた。実際に変換効率 80% のチャージポンプ整流回路を製作できれば、整流理論解析の妥当性を補強することができる。

今後、今回の研究結果を用いて多段チャージポンプ整流回路を設計する予定である。また、理論解析によれば多段チャージポンプ回路の出力電圧が段数との比例関係を持つ場合、その変換効率は 1 段チャージポンプ回路の変換効率と等しくなる。これについても、多段チャージポンプ整流回路の測定から検討を行う予定である。

参考文献

- 1) Matsubara, A., Tomiki, A., Toda, T. and Kobayashi, T.: Measurements and characterization of ultrawideband propagation within spacecraftsproposal of wireless transmission for replacing wired interface buses, in Proc. Advances in Spacecraft Technologies, Vienna, Austria(2011), pp. 61-74.
- 2) Ichihara, T., Mitani, T. and Shinohara, N.: Study on intermittent microwave power transmission to a ZigBee device, in Proc. IMWSIWPT2012, Kyoto, Japan (2012), pp. 209-212.
- 3) Shinohara, N., Mitani, T. and Matsumoto, H.: Study on ubiquitous power source with microwave power transmission, in Proc. Int. URSI Gen Assembly, c07.5(01145) (2005).
- 4) Shinohara, N., Nagano, K., Ishii, T., Kawasaki, S., Fujiwara, T., Nakayama, S., Takahashi, Y., Sasaki, S., Tanaka, K., Hisada, Y., Fujino, Y., Mihara, S., Anzai, T. and Fujino, Y.: Experiment of

- microwave power transmission to the moving rover, in Proc. AP-S Int. Symp, 3B1-1 (2007).
- 5) Kubo, Y., Shinohara, N. and Mitani, T.: Development of a kW class microwave wireless power supply system to a vehicle roof, in Proc. IMWS-IWPT2012, Kyoto, Japan (2012), pp. 205-208.
 - 6) Hanazawa, M. and Ohira, T.: Power transfer for a running automobile, in Proc. IMWS-IWPT2011, Uji, Kyoto, Japan(2011), pp. 77-80.
 - 7) Kumagai, T., Saito, K., Takahashi, M. and Ito, K.: Design of receiving antenna for microwave power transmission to capsular endoscope, in Proc. IMWS-IWPT2011, Uji, Kyoto, Japan (2011), pp. 145-148.
 - 8) Chetty, P. R. K.: Satellite Technology and its Applications, TAB BOOKS, Inc. (1988).
 - 9) Kazimierczuk, M. K.: A new concept of class-F tuned power amplifier, in Proc. 27th Midwest Circuits and Systems Symp (1984), pp. 425-428.
 - 10) Honjo, K.: A simple circuit synthesis method for microwave class-F ultra-high-efficiency amplifiers with reactance-compensation circuits, Solid-State Electronics, **44** (8) (2000), pp. 1477-1482.
 - 11) Suh, Y. H. and Chang, K.: A high-efficiency dual-frequency rectenna for 2.45- and 5.8-GHz wireless power transmission, IEEE Trans. Microwave Theory Tech., **50** (7) (2002), pp. 1784-1789.

(2017. 1. 31 受付)