

Study of a High Power Amplifier for Wireless Power Transmission in Space

H. Noji^{*1}, G. Fukuda^{*2}, M. Hori^{*3}, Y. Kobayashi^{*4}, S. Furuta^{*5}, M. Ono^{*5}, Y. Moriguchi^{*5},
T. Kato^{*4}, Z. Yamamoto^{*4}, S. Kawasaki^{*4}

^{*1}Tokyo University of Science, Graduate School of Science, Department of Applied Physics
1-3 Kagurazaka, Shinjuku-ku, Tokyo, 162-8601 Japan

^{*2}Tokyo University of Science, Faculty of Engineering Division I, Department of Electrical Engineering
1-3 Kagurazaka, Shinjuku-ku, Tokyo, 162-8601 Japan

^{*3}Tokyo University of Science, Graduate School of Engineering, Department of Electrical Engineering
1-3 Kagurazaka, Shinjuku-ku, Tokyo, 162-8601 Japan

^{*4}Japan Aerospace Exploration Agency, Institute of Space and Astronautical Science
3-1-1 Yoshinodai, chuou-ku, Sagami-hara-shi, Kanagawa, 252-5210 Japan

^{*5} NEC Network and Sensor Systems, Ltd
1-10 Nisshinchou, Fuchuu-shi, Tokyo, 183-8501 Japan

E-mail: ^{*1}h-noji@ac.jaxa.jp, ^{*4}kawasaki.shigeo@jaxa.jp

Abstract :

Application of Wireless Power Transmission (WPT) in Space, such as Solar Power Satellite/ Station (SPS) and feeding power to planetary exploration rovers, is discussed. However the realization has not been achieved due to insufficient device capabilities. Attaining WPT has some advantages, which are reducing size and weight, becoming battery less and allowing low cost. Therefore, it is necessary to improve each device's efficiency and accuracy for achieving WPT.

Particularly, conducting high power WPT in space requires high-power and high-efficiency amplifiers. Using tube amplifiers operated in high-voltage conditions in space are depreciated due to discharge possibility. High efficiency and high power amplifiers of over 1kW and PAE50%, are entreated to achieve WPT in space and to enlarge application of WPT.

In this paper, GaN having high efficiency potentials as high as tube amplifiers with lower operating voltages was focused, and a design of a S-band 100W-class GaN Solid State Power Amplifier (SSPA) is introduced. Additionally a 1kW-class GaN amplifier unit with 100W-class SSPAs and Peltier cooling equipments with PAE52.5%, was operated. Further, the structure, design method and experimental data of the 1kW-class power combiner unit with high power amplifiers are described.

WPT の宇宙空間利用にむけた高出力増幅器の研究

野地 紘史^{*1} 福田 豪^{*2} 堀 正和^{*3} 小林 雄太^{*4} 古田 重樹^{*5} 小野 専^{*5}
森口 幸男^{*5} 加藤 隆二^{*4} 山本 善一^{*4} 川崎 繁男^{*4}

^{*1} 東京理科大学 理学研究科応用物理学専攻 〒162-8601 東京都新宿区神楽坂 1-3

^{*2} 東京理科大学 工学部第一部電気工学科 〒162-8601 東京都新宿区神楽坂 1-3

^{*3} 東京理科大学 工学研究科電気工学専攻 〒162-8601 東京都新宿区神楽坂 1-3

^{*4} 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 〒252-5210 神奈川県相模原市中央区由野台 3-1-1

^{*5} NEC ネットワーク・センサ(株) 〒183-8501 東京都府中市日新町 1-10

E-mail: ^{*1}h-noji@ac.jaxa.jp, ^{*4}kawasaki.shigeo@jaxa.jp

1. はじめに

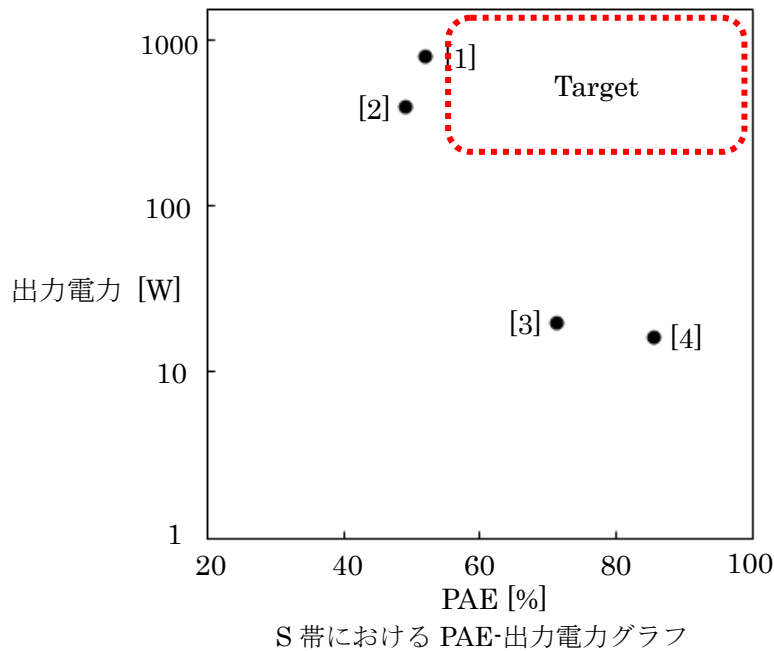
太陽発電衛星 SPS や惑星探査ローバーへの無線給電など、宇宙空間での無線電力伝送(WPT; Wireless Power Transmission)利用が検討されているものの実現には至っていない。マイクロ波、ミリ波の電波を利用した WPT は、受信側の小型軽量化、バッテリーレス化、低コスト化などが可能となるものの、実用化には各デバイスの性能向上が不可欠である。

特に、宇宙空間で大電力 WPT を行うためには送信系に高出力増幅器が必要とされる。地上では、高効率な高出力動作が求められる状況において真空管式増幅器が用いられるが、高電圧動作であるため宇宙空間での利用は放電の危険性が高く、敬遠される。本研究では、動作電圧が真空管式増幅器と比較して非常に低く、同等の効率が期待される GaN に着目し、増幅器の開発を行った。固体増幅器により高効率、高出力化を推し進めることは、WPT の宇宙空間利用の実現が近付くだけでなく、地上における WPT の展開につながるため、CW (Continuous Wave) で PAE50%を超えるような増幅器の開発を目指した。そして、DC-RF 変換効率 52.5%の S 帯 1kW 級増幅器ユニットを作製したので報告する。

2. S 帯 GaN 高出力増幅器の現状

S 帯における GaN 増幅器の研究は盛んに行われており、10W 程度の出力であれば PAE(Power Added Efficiency)が 80%に達している。S 帯 GaN 増幅器の PAE と出力電力の関係を Fig. 1 に示す。小電力であれば高効率化を実現しているものの、出力が高くなるにつれて効率は低下し、1kW 出力の PAE は 50%である。[1], [2]の測定は PW (Pulsed wave)で行われているため、WPT のような CW による利用では効率はさらに減少する。

本研究では、赤の点線で囲んだ領域をターゲットとして開発を行った。



3. 100W 級増幅器の開発

S 帯 1kW 級 GaN 増幅器ユニットの最終段に用いられる 100W 級増幅器は、小信号 S パラメータを用いて所望の動作周波数 2.1GHz に通過特性、反射特性を合わせ込む方針で設計を行った。試作した回路と小信号 S パラメータのシミュレーション値、実測値を Fig. 2, Fig. 3 に示す。小信号特性を合わせ込んだ 100W 級増幅器の入出力特性は、P3dB で 46.5dBm, PAE46%であり、100W には到達していない。そのため、銅箔テープを用いて非線形領域の特性調整を行い、調整した回路の外観を Fig. 4, 得られた入出力特性及び PAE 特性を Fig. 5 に示す。Fig. 5 より、

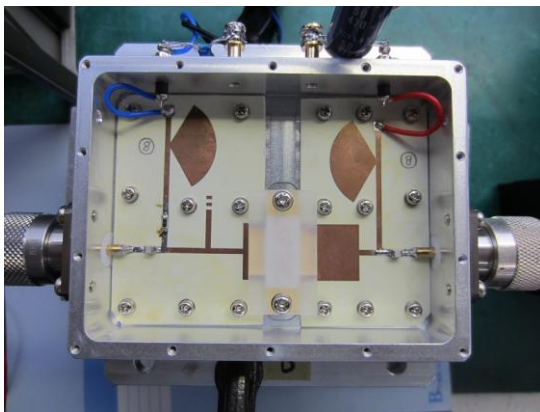


Fig. 2 100W 級増幅器の外観

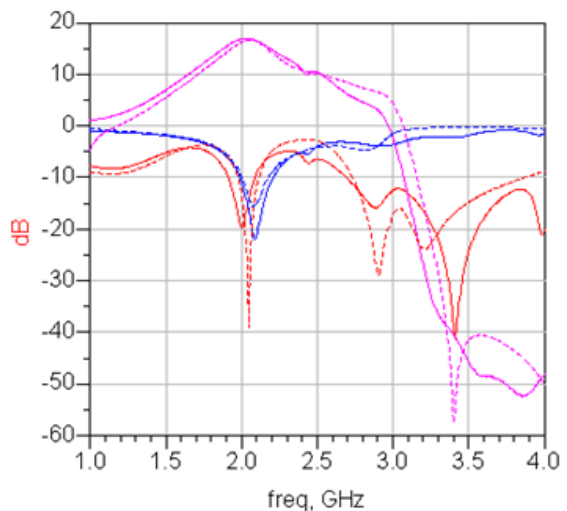


Fig. 3 100W 級増幅器の小信号特性
実線；実測値，点線；シミュレーション値
赤；S11，青；S22，ピンク；S21

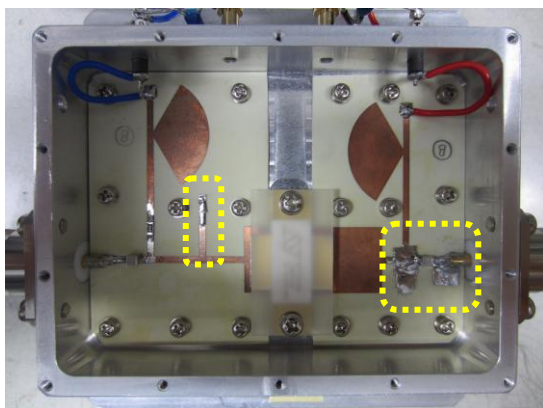


Fig. 4 調整後の 100W 級増幅器の外観
黄色部分；銅箔調整部

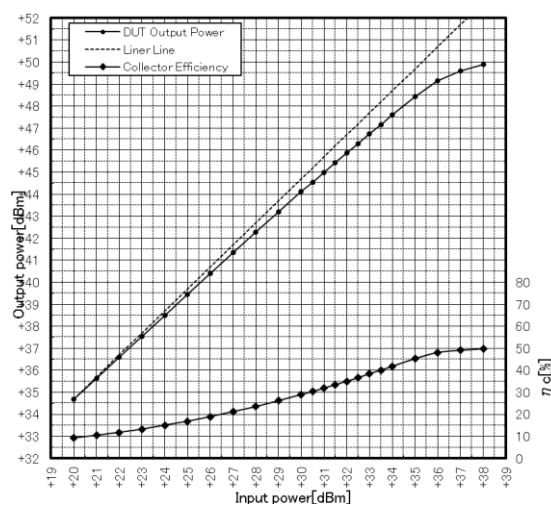


Fig. 5 100W 級増幅器の PAE, 入出力特性

38dBm 入力した際に 50dBm に到達していることが確認できる。

4. 1kW 級増幅器ユニットの開発

S 帯 1kW 級 GaN 増幅器ユニットは、前章に示した設計方針と同じ手法で作製した 2 つの 100W 級増幅器を並列配列した 200W 級増幅器の出力を 8 つ合成する構成とした。増幅器の冷却にはペルチェを用いた固体冷却装置を使用し、増幅器を一定温度に保ち、長時間運転における動作安定性を確保した。これらの増幅器及び固体冷却装置、分配器、合成器及び各電源を 0.6x0.7x0.8m のラックに収納し、コンパクトなサイズで 1kW 増幅器ユニットを実現した。その外観とブロックダイアグラムを Fig. 6 に示し、入出力特性及び 2 日間の連続運転の結果を Fig. 7, Fig.8 に示す。1kW 出力させた際の DC-RF 変換効率は 52.5% であり、2 日間の連続運転でも 970 ±10W で安定した動作を確認した。

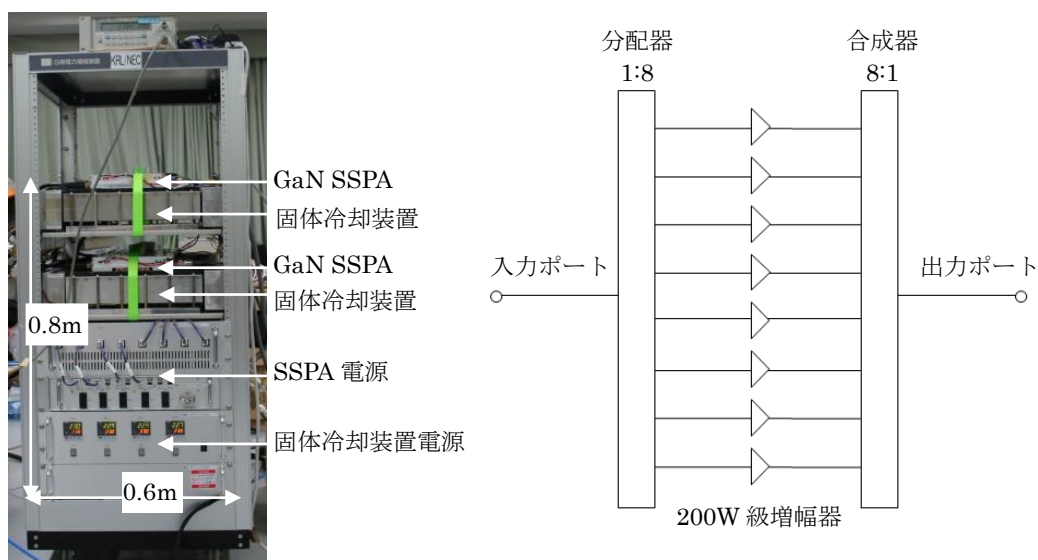


Fig. 6 S 帯 1kW 級増幅器ユニットの外観及びブロックダイアグラム

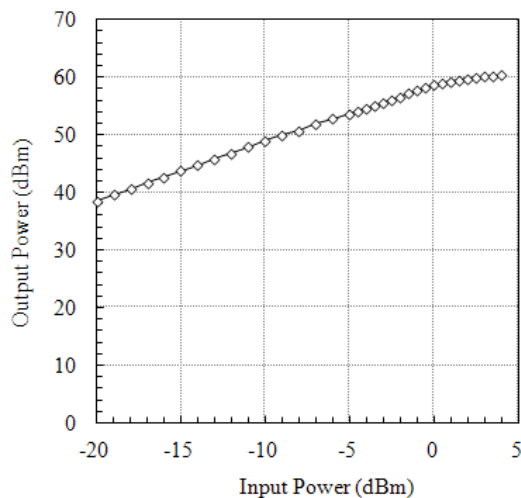


Fig. 7 1kW 級増幅器ユニットの入出力特性

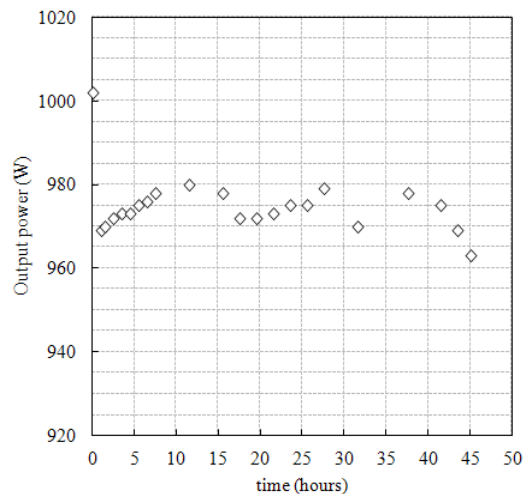


Fig. 8 1kW 級増幅器ユニットの
2 日間連続運転試験による出力変動

5. まとめ

WPT の宇宙空間利用に向けて高効率高出力な 1kW 級増幅器ユニットを作製した。1kW 出力時の DC-RF 変換効率は 52.5% であり、2 日間の連続運転でも $970 \pm 10\text{W}$ と安定した動作であることを確認した。今後は、100W 級増幅器の効率が 66% を超えるようトランジスタのモデリングを進め、非線形領域のシミュレーションによる検討を実施し、1kW 級増幅器ユニット全体の効率 60% を目指す。

今後も高出力増幅器の大電力化及び高効率化を図ることで、太陽光が届かない陰部の電子機器への電力供給など、様々なアプリケーションが提案可能となることが期待される。

参考文献

- [1] E. Mitani, M. Aojima and S. Sano “A kW-class AlGaIn/GaN HEMT Pallet Amplifier for S-band High Power Application,” EuMA 2007, pp176-179, 2007.
- [2] K. Krishnamurthy, J. Martin, B. Landberg, R. Vetury, M. J. Poulton “Wideband 400W Pulsed Power GaN HEMT Amplifiers” 2008 IEEE MTT-S, pp303-306, 2008.
- [3] Yong-Sub Lee and Yoon-Ha Jeong “A High-Efficiency Class-E GaN HEMT Power Amplifier for WCDMA Applications,” EuCAP 2006, pp624-627, 2006.
- [4] David Schmelzer and Stephen I. Long “A GaN HEMT Class F Amplifier at 2 GHz With >80% PAE,” Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium 2006, pp96-99, 2006.
- [5] H. Seita, S. Kawasaki, “Compact and High-Power Spatial Power Combiner by Active Integrated Antenna Technique at 5.8 GHz”, IEICE Transactions on Electronics, No. 11, vol. E91-C, Nov. 2008, pp. 1757-1764.
- [6] N. Shinohara, S. Kawasaki, “Recent Wireless Power Transmission Technologies in Japan for Space Solar Power Station/Satellite”, RWS2009 Digest, MO2A-4, San Diego, Jan. 2009, pp. 13-15.