

Development and measurement of 94 GHz millimeter wave rectenna under power condensing condition

Kosumo Matsui, Kimiya Komurasaki, Rei Kawashima, Hiroyuki Koizumi

Graduate school of Engineering, the University of Tokyo 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8656
Japan

E-mail: ko.matsui@al.t.u-tokyo.ac.jp

Abstract It is expected that the demand for energy in space, such as lunar base and Mars exploration, will more and more increase. Utility power satellite (UPS) is a valuable system that can supply power to such demand by wireless power transfer (WPT) technology using microwave. Brown et al. proposed the Beam Efficiency equation, which indicates that when the same antenna diameter and transmitting distance are assumed, the higher frequency is, the higher transmitting efficiency becomes due to the beam straightness. Also, since atmospheric attenuation does not occur in space, it can be said that millimeter wave, whose frequency is higher than microwave, has superiority for UPS. Rectifying antenna (rectenna), which is made by integrating a rectifying circuit and an antenna, is used to receive RF power and convert it to DC. Although many UPSs using millimeter wave have been proposed, rectenna has not been developed. Hemour et al. fabricated rectenna at 94 GHz for micro robotics and Weissman et al. fabricated for energy harvesting, respectively. 94 GHz is called an atmospheric window and has less atmospheric attenuation compared to around frequency, so it can be used for applications on the ground. However, these rectennas are fabricated for low power.

We developed 94 GHz rectenna for high power application. Before integration, rectifier and microstrip antenna was evaluated respectively using finline. When input power is 104 mW and load resistance is 125 Ω , rectifying efficiency of rectifier was 46 %. And gain of 16-element MSA array was 9.0 dBi. Also by comparing the 16-element MSA with single element, it was shown that there is room for improvement in performance by adjusting the element gap. After integration, rectenna performance was measured under power condensing condition of 5.9 mW/mm² using a dielectric lens. When input power is 38.0 mW, rectifying efficiency of rectenna was 27.4 %, and when receiving power at rectenna surface is 378 mW, rectenna conversion efficiency was 2.75 %.

94 GHz ミリ波レクテナの試作及び集光条件下での性能測定

松井宇宙 小紫公也 川嶋嶺 小泉宏之

東京大学工学系研究科 〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1

E-mail: ko.matsui@al.t.u-tokyo.ac.jp

あらまし 94 GHz のレクテナを製作し、誘電体レンズを用いて電力密度 5.9 mW/mm^2 という集光条件下で性能測定を行った。レクテナへの入力電力が 38.0 mW のとき、整流効率 27% を、レクテナ面への照射電力が 374 mW のとき、レクテナ変換効率 2.8% をそれぞれ得た。どちらも負荷抵抗が整合の得られた 125Ω のときの値である。

キーワード ミリ波、レクテナ、整流回路、マイクロストリップアンテナ、フィンライン

1. 緒言

今後月面基地、火星探査など宇宙でのエネルギー需要が益々高まることが予想される。公共電力衛星 [1] は、そのような需要に対しマイクロ波による無線電力伝送技術により電力を供給できる有益なシステムである。Brown らによるビーム収集効率の式 [2] により、同じアンテナ径と伝送距離を仮定したとき、高周波ほどビーム直進性が高いために高効率で伝送することが可能であることがわかっている。また宇宙空間では大気減衰が生じないため、公共電力衛星は高周波のミリ波帯を使用する優位性があると言える。送られた電力を受信し直流に変換して負荷で取り出すために、アンテナと整流回路が一体になったレクテナと呼ばれる素子が用いられる。ミリ波帯における衛星はいくつも提案されているものの、受電モジュールであるレクテナの開発は進んでいない。Hemour ら [3] はマイクロロボット用に、Weissman ら [4] はエナジーハーベスティング用に、それぞれミリ波帯である 94 GHz においてレクテナを製作している。94 GHz は大気の窓と呼ばれ周囲の周波数帯と比較して大気減衰が少ないため、地上でのアプリケーションに利用することも可能になる。しかしこれらレクテナは低電力向けに製作されている。

本研究ではミリ波帯である 94 GHz において大電力用途に向けたレクテナを開発した。フィンラインを用いることで整流回路とアンテナをまず別々に評価し、その後統合して性能を評価した。整流回路の入力電力が 104 mW 、整合を取った負荷抵抗が 125Ω のとき、整流効率 46% を得た。一方 16 素子マイクロストリップアレーアンテナは 9.0 dBi のゲインを得た。また、1 素子のアンテナと比較することで、素子間隔調整による性能改善の余地を示した。統合したレクテナにおいて、誘電体レンズを用いて 5.9 mW/mm^2 という集光条件下で性能測定を行った。入力電力 38.0 mW に対して整流効率 27% を、レクテナ面への照射電力 374 mW に対してレクテナ変換効率 2.8% をそれぞれ得た。

2. 整流回路およびアンテナの製作と評価

本研究では、ミリ波帯での DC ブロック挿入損失が大きいことを考慮し、DC ブロックを使わないダイオード直列挿入型の整流回路を使用した。入力側の 2 次高調波ノッチフィルタは、ダイオードで発生する高調波がフィンライン部へ戻り損失となるのを防ぐ。出力側のノッチフィルタは、交流成分を通さないことでダイオードでの変換効率を上昇させる [5]。ノッチフィルタにはともにオープンスタブが用いられている。また本研究では、比較的高耐電力使用可能なダイオード (MA4E1310, MACOM 社製) を用いて高入力電力で整流を行っている。また、アンテナは出力電力密度増加のために、16 素子のマイクロストリップアレー (以下、MSAA) を使用した。回路製作には銅箔 $18 \mu\text{m}$ 付きの誘電体基板 (NPC-F220, 日本ピラー工業製) を用いている。整流回路およびアンテナへの電力はフィンライン [6][7] を通して導波管からマイクロストリップライン (以下、MSL) へ変換されて投入される。

計測には 94 GHz の 415 mW 発振器とヘテロダイン検波器 (TR-10/94/x, ELVA-1 社製) を用いた。入力電力が 104 mW 、整合を取り負荷抵抗が 125Ω のとき、整流効率 46% を得た。また、性能既知のスロットアンテナとの比較法により 16 素子の MSAA は電力利得 9.0 dBi を得た。電磁界シミュレーター (KEYSIGHT EMPro) によるシミュレーションでは 16 素子 MSAA の利得は 18 dBi と得られており、

実測値が大幅に下がってしまったことがわかった。利得から計算される実効面積は物理的な面積よりもだいぶ小さいことから、素子間隔を狭めることで電力を取る面積の無駄をなくし、単位面積当たりの利得を改善できる可能性がある。

3. レンズによる受信電力密度測定

本研究ではレクテナへの投入電力を増加させるため、誘電体のレンズを用いてビームの集光を行っている。発振器に接続した 23 dBi のホーンアンテナとレンズとの距離を 5 cm, レンズと受信点との距離を 8 cm にした時ビームが直径 5 mm 程度まで最も集光されることが以前の測定でわかっている。本測定では、この受信点での具体的な電力を把握するために、検波器に取り付けたスロットアンテナを垂直水平方向各 8 mm の範囲 (16 素子 MSAA の物理サイズ程度) で 0.5 mm 刻みで動かした。また、検波器への投入電力上限のために、発振器側のホーンアンテナの手前には -13 dB の減衰器および結合度 30 dB の方向性結合器を接続している。測定の結果、この領域の受信電力密度は 5.9 mW/mm²とわかった。

4. レクテナ性能測定

2.にて述べた整流回路およびアンテナを統合してレクテナを製作し、3.の環境下で性能測定を行った。レクテナはジグごと 3 軸制御機構に備え付けられ、最大受信電力の角度で固定することが可能になる。整流回路と同様に負荷抵抗に並列に接続した BNC ケーブルを介して、オシロスコープによって出力電圧を観測する。2.で得られたアンテナ利得と、3.で得られた受信電力密度により求められたレクテナへの投入電力に対する出力電力としてレクテナの整流効率を、3.の受信点での電力に対する出力電力としてのレクテナ変換効率をそれぞれ計算した。その結果投入電力 38.0 mW のときレクテナの整流効率 27%, 受信点の電力 374 mW のときレクテナの変換効率 2.8%を得た。

整流回路測定より、レクテナを最大効率で動作させるには 104 mW 以上の投入電力が必要になる。今回の集光電力密度 5.9 mW/mm²の下でこの条件を達成するには、実効面積の式によりアンテナ利得が 13.37 dBi 以上必要なことがわかった。今後はこの条件を達成するべくアンテナの性能改善を行っていく必要がある。

本研究で得られた整流回路とレクテナの周波数と出力電力及び整流効率の関係を先行研究のレクテナと比較したグラフを Fig. 3 に示している。[3-4][8-14].

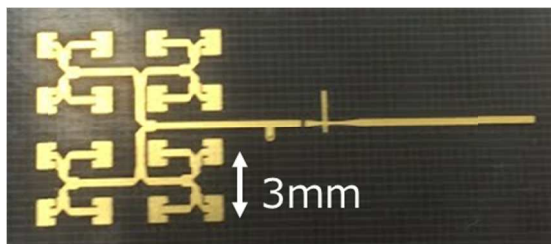


Fig. 1 製作したレクテナ

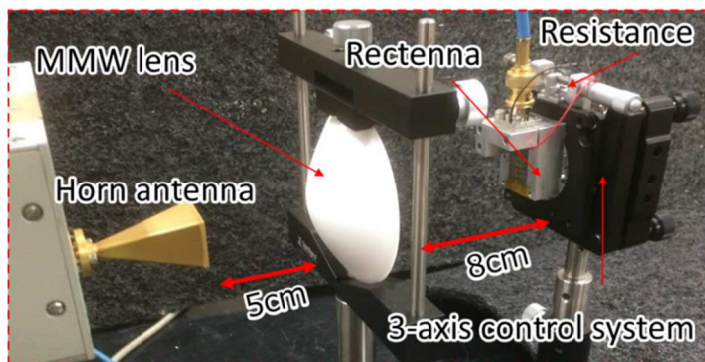


Fig. 2 レクテナ測定手法

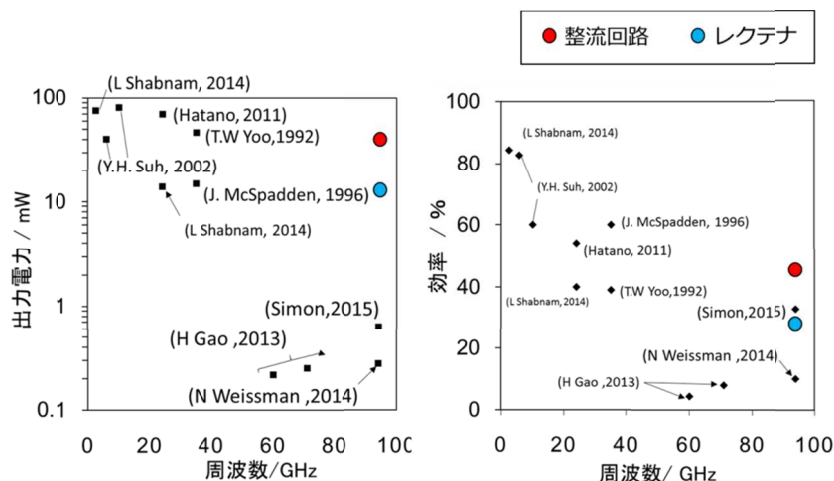


Fig. 3 本研究の整流回路とレクテナの先行研究との比較。
周波数と出力電力の関係（左）。周波数と整流効率の関係（右）

5. 結言

94 GHz の整流回路，アンテナおよびそれらを統合したレクテナを製作し評価を行った。

- ・整流回路は，投入電力 104 mW，整合を取った負荷抵抗 125 Ω において整流効率 46 % を記録した。
- ・16 素子マイクロストリップアンテナアレーは，94 GHz において電力利得 9.0 dBi を得た。
- ・レクテナへの投入電力増加のために誘電体レンズを用いて集光を行い，受信条件 5.9 mW/mm² を得た。
- ・統合したレクテナの性能測定によって，レクテナへの入力電力に対して整流効率 27 %，受信点でレクテナが受ける電力に基づくレクテナ効率 2.8 % を得た。ともに負荷抵抗は 125 Ω の時だった。

文 献

- [1] K. Chang, J. C. McCleary, M. A. Pollock: Feasibility Study of 35 GHz Microwave Power Transmission in Space, *Space Power*, vol. 8, no. 3, pp. 365-370, 1989.
- [2] W. C. Brown, "Beamed microwave power transmission and its application to space," *IEEE Trans. MTT*, vol. 40, no. 6, pp.1239-1250, 1992.
- [3] S. Hemour, C. H. P. Lorenz, and K. Wu, "Small-footprint wideband 94GHz rectifier for swarm micro-robotics," *2015 IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. IMS 2015*, no. I, pp. 5-8, 2015.
- [4] N. Weissman, S. Jameson, and E. Socher, "W-Band CMOS on-chip energy harvester and rectenna," *IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig.*, pp. 1-3, 2014.
- [5] 波多野健, 篠原真毅, and 三谷友彦, "24GHz 帯 F 級負荷装荷レクテナの改良," *Ieice 信学技報*, vol. WPT2011, pp. 3-6, 2012.
- [6] K. Fujiwara, "Low-cost W-band frequency converter with broad-band waveguide-to-microstrip transducer," pp. 4-7, 2016.
- [7] 日本国特許出願 No. 2016-243600, 2016.
- [8] Y. H. Suh and K. Chang, "A high-efficiency dual-frequency rectenna for 2.45- and 5.8-GHz wireless power transmission," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 50, no. 7, pp. 1784-1789, 2002.
- [9] T. W. Yoo and K. Chang, "Theoretical and Experimental Development of 10 and 35 GHz Rectennas," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 40, no. 6, pp. 1259-1266, 1992.
- [10] S. Ladan, S. Hemour, and K. Wu, "Towards millimeter-wave high-efficiency rectification for wireless energy harvesting," *2013 IEEE Int. Wirel. Symp. IWS 2013*, pp. 7-10, 2013.
- [11] K. Hatano, "Development of 24GHz-Band MMIC Rectenna," *Radio and Wireless Symposium (RWS). IEEE 2013*, vol. 50, pp. 199-201, 2013.
- [12] M. J. C. Kai, and P. A D, "Microwave Power Transmission Research at Texas A&M University," *Sp. Energy Transp.*, vol. 1, no. 4, pp. 368-393, 1996.
- [13] H. Gao, U. Johannsen, M. K. Matters-Kammerer, D. Milosevic, A. B. Smolders, A. Van Roermund, and P. Baltus, "A 60-GHz rectenna for monolithic wireless sensor tags," *Proc. - IEEE Int. Symp. Circuits Syst.*, pp. 2796-2799, 2013.
- [14] H. Gao, M. K. Matters-Kammerer, P. Harpe, D. Milosevic, U. Johannsen, A. Van Roermund, and P. Baltus, "A 71GHz RF energy harvesting tag with 8% efficiency for wireless temperature sensors in 65nm CMOS," *Dig. Pap. - IEEE Radio Freq. Integr. Circuits Symp.*, pp. 403-406, 2013.