

2. マイクロ波受電用レクテナアレイの 基礎実験

伊藤 猛男*¹ 藤野 義之*² 藤田 正晴*³

(1998年6月15日受理)

2. FUNDAMENTAL EXPERIMENT OF A RECTENNA ARRAY FOR MICROWAVE POWER RECEPTION*

By

Takeo ITO, Yoshiyuki FUJINO, and Masaharu FUJITA

A rectenna element applicable to a Stratosphere Radio Relay System was proposed, and a fundamental microwave power transmission experiment was carried out at 2.45 GHz using a rectenna array manufactured on the basis of the proposal. The rectenna element consists of a circular microstrip patch and a rectifying circuit with a novel balanced-type design. The circuit enables the mounting of a rectifier and circuit components on just one side of a substrate without through holes, hence making it easy to manufacture even a rectenna with a large aperture. It was verified by preliminary experiment that the rectifying circuit can provide more than 1 W of DC output power using 8 Shottky diodes as a rectifier with microwave-DC conversion efficiency of 67%. Then, DC output power of 4 W was obtained from the 4-element rectenna array in the microwave power transmission experiment carried out in a radio anechoic chamber. The data showed the feasibility of practical application of the microwave power transmission technique.

[キーワード] 成層圏無線中継システム, マイクロ波電力伝送, レクテナ, 整流回路, マイクロストリップパッチアンテナ

Stratosphere radio relay system, Microwave power transmission, Rectenna, Rectifying circuit, Microstrip patch antenna

1. はじめに

成層圏無線中継システムは、高度約 20 km の成層圏内に無人の飛行体を滞留させ、これに搭載

*1 元 電磁波技術部通信デバイス研究室

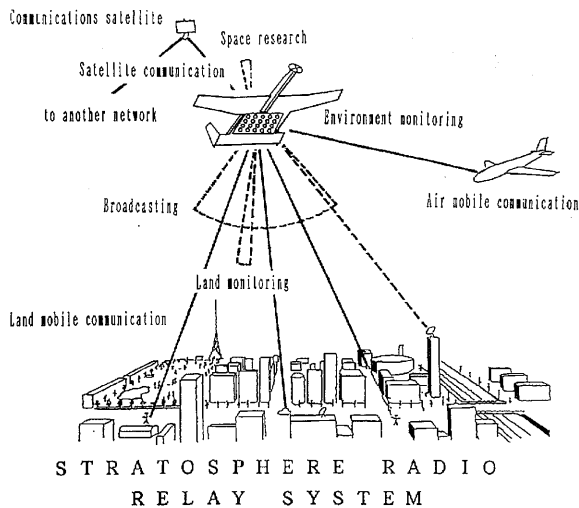
*2 企画部企画課 (ATR 環境適応通信研究所出向中)

*3 地球環境計測部

*本論文の内容は文献(1)に発表されたものである。

した中継器を用いて移動通信のネットワークを形成することを目的としており、このシステムによって実現される移動通信のサービスエリアの大きさは、丁度地上の移動通信と衛星を用いた移動通信サービスの中間に位置するものである。この成層圏無線中継システムは、その他環境監視や宇宙観測などにも使用することが出来る⁽²⁾。同システムの運用イメージを第1図に示す。

成層圏無線中継システムの飛行体を、長時間に



第1図 成層圏無線中継システムの運用イメージ

わたって成層圏内に滞留させるためには、何等かの手段によって飛行に必要なエネルギーを継続的に供給する必要がある。太陽電池はエネルギー供給のための一つの候補であるが、夜間には電気エネルギーを得ることが出来ず、飛行を継続出来ないという欠点がある。夜間に備えて二次電池を搭載することが考えられるが、重量面で問題がある。これに対し、マイクロ波電力伝送によれば、時間に関わらずエネルギー供給を行うことが出来るので、太陽電池による方法よりも実現性が高いと考えられる。当該技術は成層圏無線中継システムの飛行体などのように、孤立した、あるいは移動する物体に対するエネルギー供給手段として非常に重要であるばかりでなく、宇宙空間に展開した巨大な太陽電池で発電した電気エネルギーをマイクロ波ビームによって地球に伝送する太陽発電衛星 (SPS) 計画においても、キーテクノロジーの一つとして重要な位置を占めている。マイクロ波電力伝送においては、マイクロ波ビームから電気エネルギーを取り出すために、レクテナ⁽³⁾と呼ばれる受電用システムが用いられる。レクテナに関するいくつかの研究が我が国においてなされている⁽⁴⁾⁽⁷⁾が、これらはSPSシステムを想定したものである。成層圏無線中継システムにおいては、飛行体に取り付けるためにレクテナは軽量で、薄い平面状でなくてはならない。なお、このような目的に関して、最近、カナダのSHARP (Stationary High Altitude Relay Platform) 計画

のための、高電力レクテナの論文⁽⁸⁾が発表されたことを付記する。

本論文では、飛行体に搭載するための新しいレクテナの設計と開発、およびこれを用いたマイクロ波電力伝送実験の結果について述べる。

2. 設 計

レクテナ素子は、伝搬してくるマイクロ波を受信し、直流電力に変換する機能を持つ。レクテナ素子は通常、アンテナ素子、整流器およびフィルターで構成される。アンテナ素子としては、半波長ダイポールアンテナが用いられることが多い。整流器は非線形の入出力特性を持ち、従ってマイクロ波を整流する際に高次の高調波を発生する。この高調波はアンテナから再放射される。高調波電力は受信されるマイクロ波電力に比べて十分小さいが、レクテナ面全体を照射するマイクロ波電力の総量が非常に大きいため、高次高調波の発生割合が小さいとはいえ、電磁環境の立場から見たとき、その影響を無視することは出来ない。ここで注意しなければならないことは、半波長ダイポールアンテナは高次高調波周波数においても共振するということである。そこで、レクテナから高次高調波が再放射されることを抑制するために、フィルターが使用される。高次高調波の再放射をより一層抑制するためには、高次高調波周波数におけるアンテナ素子の放射効率を低下させることが有効である。そこで、本レクテナ開発においては、文献⁽⁴⁾⁽⁵⁾で提案されているように、円形マイクロストリップパッチアンテナをアンテナ素子として採用する。これは、円形マイクロストリップパッチアンテナの共振周波数はベッセル関数の根に比例し、高次高調波周波数では共振しないからである。この選択は、成層圏無線中継システム用レクテナは飛行体に搭載するため薄い平面状でなくてはならないとの要求をも満足するものである。

マイクロストリップ構造は、地板によって整流器を含む整流回路を強いマイクロ波の照射から保護するという点からも、レクテナ用として適している。製作と調整の容易さから、整流回路部と給電部は一枚の基板上に設けられることが望ましい。整流器を接続するために基板に設けるスルーホールが不要な平面型の整流回路を実現するため、こ

ここでは逆相二点給電方式⁽⁹⁾と呼ばれる新しい平衡型給電方式を提案している。この給電方式を採用した新しい整流回路を第2図に示す。ここで、周波数はISMバンド内の2.45 GHzを想定している。

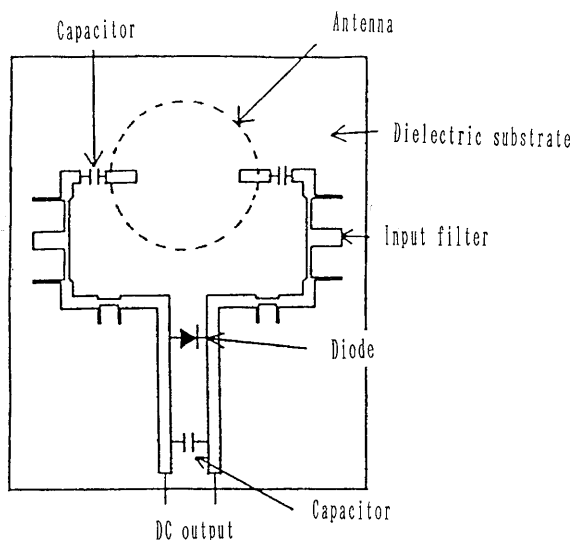
第2図に示すように、円形パッチはその位相が180度異なる二点で給電されている。円形パッチに接続される2本の特性インピーダンス50Ωのマイクロストリップ線路は、コンデンサ・フィルタが付加されたのち、間隔が2mmの並行線路に変換される。整流用のダイオードやコンデンサ等を実装するためには、並行線路の間隔は狭い方が望ましいが、あまり狭いと線路間の相互結合が起こり、線路のインピーダンス特性を乱すこととなる。各マイクロストリップ線路の特性インピーダンスは50Ωであるから、並行線路では100Ωとなる。いくつかの異なる間隔を持つ並行線路のインピーダンス特性の測定を行った結果、間隔が2mm以上であれば、相互結合の影響を無視できることが分かった。この結果から、先に述べたように並行線路の間隔を2mmと決定した。整流用のダイオードは並行線路の起点に接続し、3次と5次の高調波を除去するためのフィルタ（入力フィルタ）を、アンテナの給電点とダイオードの間に設けた。マイクロ波は整流された後、直流エネルギーが並行線路に導かれる。並行線路上で、整流用ダイオードから $\lambda_g/4$ 離れた位置

にコンデンサが接続されている。ここで λ_g は基板中を伝搬する2.45 GHz波の波長である。このコンデンサの作用により、整流用ダイオードから見た並行線路のインピーダンスは偶数次高調波周波数において零、奇数次高調波周波数において無限大となる。であるから、偶数次高調波は短絡されて再放射されることはない。一方、奇数次高調波は並行線路で反射されてアンテナ素子側に戻るが、3次および5次の高調波を除去するフィルタの働きにより、アンテナ部から再放射されることは阻止される。7次以上の高調波については、その絶対値が低次の高調波に比べて十分に小さいので、対策は特に施してはいない。このコンデンサ以降には、原理的にマイクロ波成分は存在しない。

本レクテナの設計にあたり、電磁結合方式のアンテナ給電法を採用すれば、アンテナ部と整流回路部を完全に分離することが出来る。このようにすればアンテナ部と整流回路部を独立に最適化できるので、マイクロ波・直流変換効率の向上に有効と考えられる。従って、電磁結合方式の採用を計画したが、後でも述べるように、本実験においては簡単のため、通常のピン結合方式を採用することとした。

3. 整流回路の基本特性

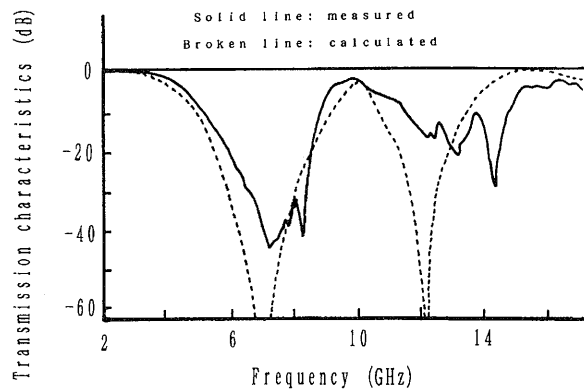
実際にマイクロ波電力伝送実験を実施するのに先立ち、前節で述べた新しい整流回路を試作して、ケーブルによりマイクロ波を加えてその基本特性を測定した。3次および5次高調波の除去フィルタは、文献(10)を参考にして最大平坦通過帯域を持つように設計した。フィルタの伝達特性を第3図に示す。設計値と測定値は必ずしも一致していないが、これは湿式エッチング法をもちいて幅の狭いスタブを作成したときの寸法誤差によるものと考えられる。整流器は、市販品のなかからその特性を考慮してHP 5082-2350 GaAsショットキーダイオードを選んだ。しかし、このダイオードは高電力を取り扱うようには設計されておらず、特性はレクテナ用としては不十分であった。HP 5082-2350 ダイオードの特性は、降伏電圧30V、電力損失100mWである。従って、一本のダイオードを整流器として使用した、予備実験におい



第2図 新しく提案する整流回路

第1表 整流回路で発生する高次高調波のレベル。
f は基本周波数 2.45 GHz を示す。

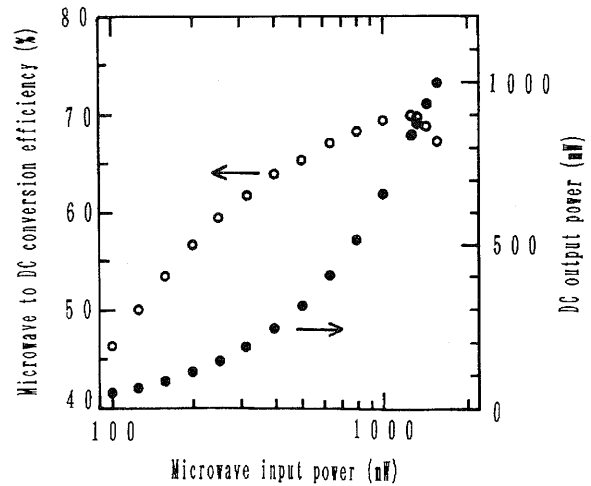
f	2f	3f	4f	5f
0 dB	-48.5 dB	-102.7 dB	-72.4 dB	-102.5 dB



第3図 3次および5次高調波の除去フィルタ（入力フィルタ）の伝達特性

得られた最大の直流出力電力は、0.12 W にすぎなかった⁽¹¹⁾。次に入力フィルタの効果を確認するため、整流回路で発生する高次高調波の測定を行った。結果を第1表にまとめて示す。基本波成分に対して、高次高調波が -50 dB 以下となるようにフィルタを設計したにもかかわらず、2次高調波はこの基準を 1.5 dB 上回った結果が得られた。しかし、円形パッチアンテナは2次の高調波周波数においては共振しないので、全体として上記の目標を達成することが出来ると考えられる。3次以上の高調波のレベルは非常に低いが、これはダイオードの高次高調波発生特性そのもの、および入力フィルタの働きによるものと考えられる。高次高調波の発生特性はダイオードによって異なるので、ダイオードの選択にあたっては、マイクロ波・直流変換効率のみならず高調波の発生特性にも注意を払う必要がある。レクテナからの出力電力を増加するためには、より高い降伏電圧と消費電力を持つダイオードが必要である。しかし、このような特性を持つ、マイクロ波帯で使用できるダイオードはこの時点では入手できなかった。

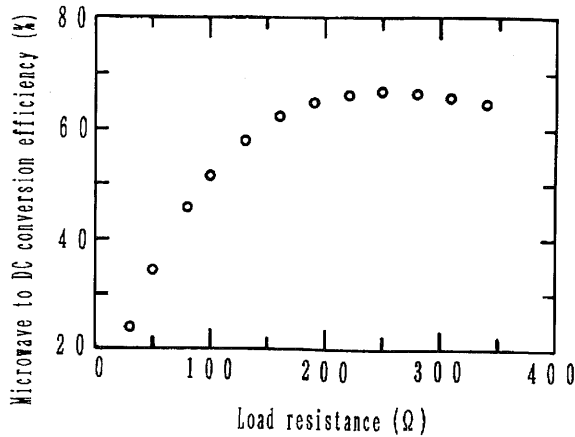
そこで、本実験においては、1 W 以上の直流出力を目的として、前に述べたダイオードを2本



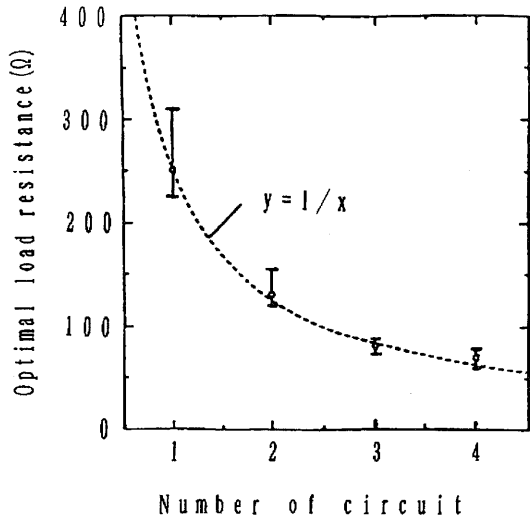
第4図 ダイオード8本を用いた高出力レクテナ整流部のマイクロ波入力、直流出力特性。
マイクロ波・直流変換効率も併せて示す。

直列に接続し、さらにこれを4組並列に接続して整流器を構成した⁽¹²⁾。第4図にダイオードを8本使用した整流回路の、マイクロ波・直流変換特性を示す。実験では負荷抵抗として 250 Ω を使用した。マイクロ波電力の測定には通常の電力計を使用し、直流出力電力は負荷抵抗の両端の電圧から計算で求めた。図から、1 W の直流出力が、マイクロ波・直流変換効率 67 % で得られていることが分かる。マイクロ波・直流変換効率の最大値は 71 % であるが、この時の直流出力は 0.84 W にとどまっている。マイクロ波入力電力を上げていけば降伏電圧に達するまでは直流出力電力は増加するが、今回の試験の目的は達成されたので、直流出力 1 W で実験は終了した。第5図に、負荷抵抗に対するマイクロ波・直流変換効率の変化を示す。最大効率は負荷抵抗が 250 Ω の時に得られていることが分かる。しかしながら、マイクロ波・直流変換率は負荷抵抗の変化にあまり大きく依存しない。

レクテナはその開口面積を大きくして直流出力電力を増加させるため、通常アレイの形で使用される。そこで、整流回路を並列に接続し、負荷抵抗を共有することによって直流出力電力を増加する実験を行った。結果をまとめた第2表から明らかのように、並列接続の回路数が増すにつれ、直流出力電力が増加していることが分かる。また、最適負荷抵抗は、第6図に示すように並列回路数



第5図 負荷抵抗の変化に対するマイクロ波・直流変換効率の変化



第6図 整流回路を並列運転した際の、並列数と最適負荷抵抗の関係

に反比例することが分かる。ここで、並列の整流回路数が増すに従って、直流出力電力も増加しているが、逆にマイクロ波・直流変換効率は低下している。第4図に示すように、マイクロ波・直流変換効率は入力電力の関数であり、その最大値を与える入力電力はダイオードの特性のばらつきによって整流回路ごとに異なる値をとる。複数の整流回路が並列に接続され、負荷抵抗を共有する場合には、各整流回路は必ずしも最適条件では動作しておらず、それぞれのマイクロ波・直流変換効率は互いに異なる値をとる。今回の実験では、回路間のマイクロ波・直流変換効率の差は最大で7%であった。このような状況下では、文献(13)に示

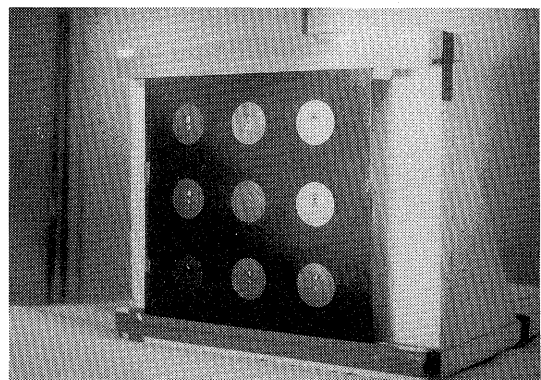
されているように、全体としてのマイクロ波・直流変換効率は低下する。同じ電力のマイクロ波を整流回路に与えたとき、マイクロ波・直流変換効率の違いによって、整流回路ごとに直流出力電力は異なる。並列に接続する整流回路数が増加するとき、各整流回路の特性のばらつきによって第2表に示すように、全出力電力の増加は回路数に対して一様ではなくなる。

4. マイクロ波電力伝送実験

マイクロ波電力伝送実験のために、2.45 GHzのレクテナアレイを試作した。このレクテナアレイのアンテナ部は9素子の正方格子配列であり、素子間隔は0.7波長である。アンテナ素子の偏波は、送電用システムの偏波特性に合わせて直線とした。アンテナ部、および整流回路部には、比誘電率が2.17の1.6 mm厚、および0.8 mm厚のテフロン基板を使用した。設計の際には電磁結合方式の給電を想定したが、試作の容易さを勘案して本レクテナアレイでは通常のピン給電方式を採用した。第7図に試作したレクテナアレイの外観を示す。中央のアンテナ素子にはマイクロ波電力計を接続し、実験中にレクテナ面を照射するマイク

第2表 並列運転を行う整流回路数と直流出力電力、およびマイクロ波・直流変換効率

Number of circuits	DC output power (W)	Efficiency(%)
2	1.55	67.1
3	2.03	65.9
4	3.36	63.3



第7図 試作したレクテナアレイの外観

ロ波強度のモニターに使用した。手持ちのダイオード数の制限から、中央の素子に対して対称で、かつ中央からの距離が近い各辺の真ん中の計4個のアンテナ素子にのみ整流回路を接続した。また素子間相互結合を全ての素子に整流回路が接続されている状態に近付けるため、残りの各頂点の4個のアンテナ素子は50Ωの整合負荷によって終端した。また、マイクロ波送電器は半波長ダイポールアンテナを素子とするアクティブフェーズドアレイ構成であり、実験時の送電電力は約60Wであった。実験は当所の電波無反射室内で行われ、マイクロ波送電器とレクテナアレイの間隔は約60cmとした。第8図に実験のブロック図を、第9図に実験写真を示す。

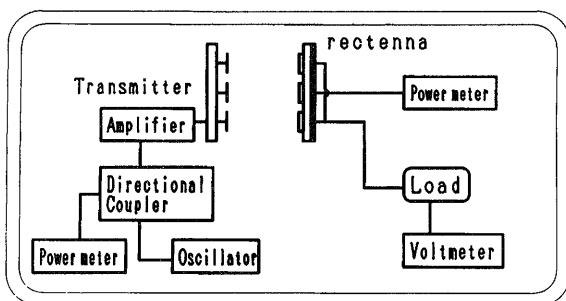
マイクロ波電力伝送実験に先立ち、マイクロ波受電用のレクテナ面におけるマイクロ波の電力束密度を切り離し導波管をプローブとして測定した。レクテナアレイへのマイクロ波総入力電力は、レクテナ面における電力束密度を積分して求めた。実験中、入力マイクロ波電力はレクテナ中央のアンテナ素子によってのみ測定され、電力束密度分

布の形が変わらないものとして次式により、総入力電力を計算した。

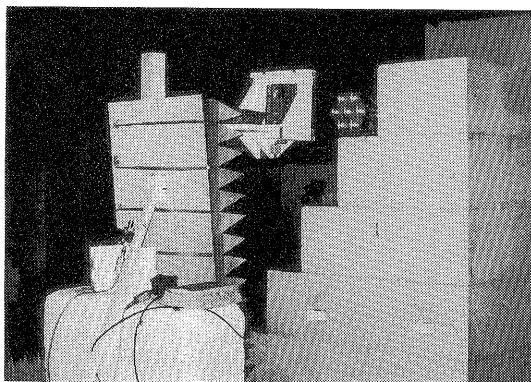
$$\text{マイクロ波総入力電力} = \frac{P_m}{P_c} \int_s PFD ds \dots\dots(1)$$

ここに PFD はレクテナ開口面上の電力束密度分布、 P_c は電力束密度分布を測定した際のレクテナ中央部におけるマイクロ波受信電力、 P_m はマイクロ波電力伝送実験中に中央のアンテナ素子で受信されたマイクロ波電力、 s はレクテナの開口面積である。第10図に当所の電波無反射室で実施したマイクロ波電力伝送実験の結果を示す。4素子レクテナアレイを用いて、マイクロ波ビームから4Wの直流電力がマイクロ波・直流変換効率61%で得られていることが分かる。この効率は、整流回路のみを対照とした実験とほぼ同じ値であった(第2表参照)。これらのわずかな効率の違いは、入力電力の差によるものと考えられる。送信電力を増加すればより大きな直流出力電力が得られるが、マイクロ波・直流変換効率は低下することに注意せねばならない。マイクロストリップアンテナの放射効率は概ね90%である⁽¹⁴⁾から、本レクテナアレイの全体的なマイクロ波・直流変換効率は55%程度と見積もられる。

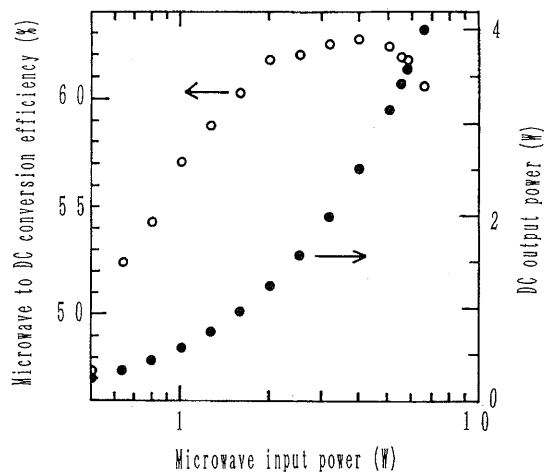
本結果によれば、マイクロ波電力伝送技術の実際的な適用の可能性が定量的に示された。レクテナから再放射される高次高調波の抑制に関連して、電波環境に関する研究を継続する予定である。



第8図 マイクロ波電力伝送実験のブロック図



第9図 マイクロ波電力伝送実験の様子



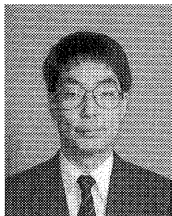
第10図 マイクロ波電力伝送実験の結果。マイクロ波・直流変換効率を併せて示す。

5. 結 論

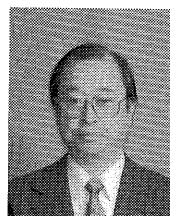
本論文では、円形マイクロストリップパッチアンテナ、及び新しい平衡型整流回路で構成される平面レクテナを提案した。整流回路は逆相二点給電法式を採用しており、整流器などを基板の一方の面にのみ実装することが出来るという特長がある。予備実験により、8本のダイオードを使用した整流回路をもちいて、直流出力1Wをマイクロ波・直流変換効率67%で得られることを示した。また、電波無反射室内で実施したマイクロ波電力伝送実験により、4素子のレクテナアレイを用いて4Wの直流出力がマイクロ波・直流変換効率61%で得られた。このことは、当該技術が実用的に使用可能であることを示唆している。マイクロ波・直流変換効率は、回路部のより精密な調整により改善されるものと期待される。なお、レクテナからの高次高調波の再放射に伴う電磁環境問題に関しては、より一層の研究が必要である。

参 考 文 献

- (1) T. Ito, Y. Fujino, and M. Fujita, "Fundamental experiment of a rectenna array for microwave power reception", IEICE Trans. Commun., Vol.E76-B, No.12, pp.1508-1513, 1993.
- (2) 高澤金吾, 森 弘隆, "成層圏無線中継システムについて—高高度無人航空機の移動通信への適用の検討", 信学誌, Vol.73, No.1, pp.69-71, 1990.
- (3) W. C. Brown, "The history of power transmission by radio waves", IEEE Trans. Microwave Theory & Tech., Vol.MTT-32, No.9, pp.1230-1242, 1984.
- (4) 伊藤精彦, "太陽発電衛星受電用地球局端末素子「レクテナ」に関する基礎的研究", 昭和58年度科学研究費補助金(一般研究(B)課題番号56460102)研究成果報告書, 1984年3月.
- (5) 伊藤精彦, 後藤尚久, "電力無線送受電空中線", 特許公報, No.1533411, 1989年12月12日.
- (6) 島貫靖士, 安達三郎, "マイクロ波電力伝送用アレイの理論的・実験的研究", 信学論(B), Vol.J67-B, No.11, pp.1301-1308, 1984.
- (7) 大塚昌孝, 大室統彦, 柿崎健一, 斉藤誠司, 黒田道子, 堀内和夫, 副島光積, "有限レクテナアレイの素子間隔と受電効率", 信学論, Vol.J73-B-II, No.3, pp.133-139, 1990.
- (8) A. Alden and T. Ohno, "Single foreplane high power rectenna", Electron. Lett., Vol.28, No.11, pp.1072-1073, 1992.
- (9) 時澤 勝, 伊藤猛男, 藤田正晴, 手代木扶, "成層圏無線中継システム用レクテナ素子の研究", 信学技報, AP 89-108, 1990年2月.
- (10) 赤尾宗一, 浜崎襄二, "最平坦通過特性を持つ帯域遮断濾波器", 信学マイクロ波研資, MW 68-39, 1968年9月.
- (11) 伊藤猛男, 時澤 勝, 藤田正晴, 手代木扶, "成層圏無線中継システム用レクテナ その1", 1990年信学春大, B-113, 1990年3月.
- (12) 伊藤猛男, 藤野義之, 行田弘一, 藤田正晴, "成層圏無線中継システム用レクテナ その2", 1991年信学秋大, B-69, 1991年9月.
- (13) R. J. Gutmann and J.M. Borrego, "Power combining in an array of microwave power rectifiers", IEEE Trans. Microwave Theory & Tech., Vol.MTT-27, No.12, pp.958-968, 1979.
- (14) 伊藤精彦, 大鐘武雄, 小川恭孝, "磁流アンテナを用いたレクテナの受電効率", 信学技報, AP84-69, 1984年11月.



藤野 義之
Yoshiyuki FUJINO
企画部企画課(ATR 環境適応通信研究所出向中)
E-mail: fujino@acr.atr.co.jp



藤田 正晴
Masaharu FUJITA
地球環境計測部
マイクロ波リモートセンシング
E-mail: mfujita@crl.go.jp

