

Development of Microwave Power Transmission System with Active Integrated Antenna*

Kazuyoshi Nanokaichi, Naoki Shinohara, Tomohiko Mitani and Hiroshi Matsumoto

Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University

Gokasho, Uji, Kyoto 611-0011

Abstract

Development of Microwave Power Transmission (MPT) System with huge phased arrays (diameter: 1.0km~), very accurate beam control (less than 0.0001 degree), high overall efficiency and light weight is necessary to realize Space Solar Power System (SSPS) economically. To satisfy these requirements, a Phase Controlled Magnetron (PCM) is considered to be suitable for a microwave transmitter. The PCM, developed by our research group, takes advantages of high power, high DC-RF conversion efficiency, low cost, and light weight. A typical output power from the PCM is more than 300W, while an output power from one antenna element is less than 1W for SSPS parameters. Power dividers and phase shifters after the PCM output are necessary to satisfy SSPS parameters and it leads to disadvantages. The power dividers and the phase shifters are inserted after the high power microwave output, thus an insertion loss in these elements is critical for overall efficiency. Therefore, the loss after the PCMs must be reduced to realize the PCM-based MPT system.

In this paper, a slot-coupled Active Integrated Antenna (AIA) system is proposed as one of the solution of the MPT system for SSPS, which is composed of a waveguide slot as a power divider, an AIA as an active device part (low-loss phase shifter / high efficiency amplifier) and a planar antenna layer. By using an electromagnetic coupling between the AIA and the waveguide slots, thin and light AIA structure can be realized. One of the important factors of the slot-coupled AIA is a coupling factor of the electromagnetic coupling between microstrip lines and waveguide slots. In the study, improvement of the coupling factor is studied. By tuning the electromagnetic coupling structure, mainly the waveguide dimensions, a coupling factor of more than 90% is achieved for 2-element model. Besides, semiconductor-amplifier-based MPT system is also studied. Amplifier integrated on the AIA should have high power, high efficiency and small size to realize thin planar AIA structure. As a basic study for high-efficiency AIA amplifiers, a Class AB amplifier is studied, designed and fabricated. Measured S-parameters are good agreement with simulated results. Measured PAE is 47% at 0dBm input power.

* Presented at 7th SPS Symposium, 16-17 September, 2004

アクティブ集積アンテナを応用したマイクロ波エネルギー伝送システムの開発研究^{注1}

七日市 一嘉†, 篠原 真毅, 三谷 友彦, 松本 紘 (京都大学生存圏研究所)

611-0011 京都府宇治市五ヶ庄

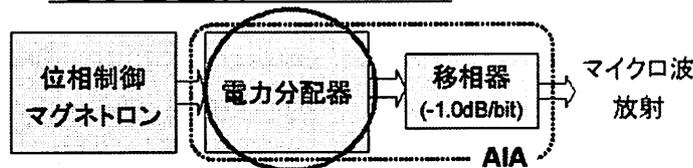
†nanoka@rishi.kyoto-u.ac.jp

要旨：宇宙太陽発電システム(SSPS)におけるマイクロ波送電システムには、直径数 km に及ぶ超大型フェイズドアレイを用いた高速・高精度なビーム制御、送電システム全体として高効率、軽量であることが求められる。本研究では、その効率向上・小型軽量化を目指してアクティブ集積アンテナ(AIA)を応用したマイクロ波送電システムの検討を行っている。本システムは給電部を導波管スロットとし、AIA で位相制御、増幅を行うシステムであり、能動素子と平面アンテナが同一基板に構成されるため伝搬損の軽減・小型軽量化が可能で、薄型のフェイズドアレイを実現することができる。本報告では導波管スロット給電部および増幅部の検討結果について示す。

1. はじめに

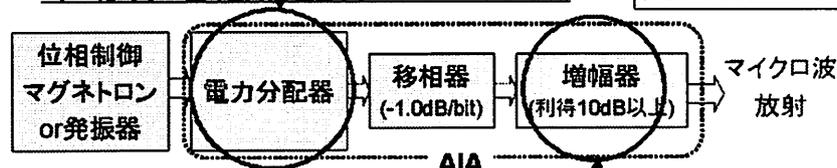
宇宙太陽発電システム(SSPS)をビジネスモデルとして成立させるため、そのマイクロ波送電技術には直径数 km の送受電アンテナ、超高精度なビーム制御 (0.0001 度以下の精度)、また宇宙システムとして成立させるために、送電部全体として高効率で 1.0g/W 以下の軽量であることなどが求められている。送電部の中核をなす DC-RF 変換素子としては、当研究グループでは安価・高効率・高出力という特徴を有するマグネトロンに注目し、その位相制御を可能とした位相制御マグネトロン(Phase Controlled Magnetron : PCM)を開発している[1]。PCM のようなマイクロ波電子管を SSPS に適用する場合、送電出力数 GW、送電アンテナ径数 km 程度というパラメータに整合させるために、その後段に電力分配器および移相器の挿入が必要となり、それらの通過損失低減が課題である。本研究では、高効率・軽量を実現し得るマイクロ波送電システムとして、導波管スロット給電アクティブ集積アンテナを提案する。

・ 電子管主体のシステム



検討1.電力分配器の低損失化
(電磁結合部の結合度向上)

・ 半導体増幅器主体のシステム



検討2.AIA用増幅器の検討

図1：本研究で検討するAIAを用いた送電システムのブロック図

注1 第7回 SPS シンポジウム, 九州工業大学, 2004年9月16, 17日開催

図1に、本研究で検討するアクティブ集積アンテナ(Active Integrated Antenna : AIA)を用いた送電システムのブロック図を示す。本研究では、当システムにおける(1)電力分配部の低損失化の検討、および半導体増幅器主体のシステムにおける(2)AIA部の増幅器に関する基礎検討を行っている。

導波管スロット給電アクティブ集積アンテナは、低損失な導波管スロットを電力分配部として用い、位相制御・増幅・放射部にアクティブ集積アンテナ技術を適用したシステムである。図2にその概念図を示す。導波管スロットを電力分配部として用いる利点は、給電線路部における放射損失が無いこと、製作が容易であること、薄型化が可能であること、および管壁を利用して放熱が可能であることである。欠点としては、共振を用いているために帯域が狭いことが挙げられる。導波管スロット上に装荷されるアクティブ集積アンテナ(AIA)部においては、低損失移相器による位相制御、増幅および平面アンテナによる放射を担う。AIAとは能動回路を平面アンテナと一体的に構成したシステムであり、能動回路とアンテナを別々に作成する従来のシステムと比較して、伝搬損が低減でき、小型軽量化を図ることができる。導波管スロットとAIA間は、電磁結合を利用して電力を結合させるために、システムの厚さを導波管の厚さ+誘電体基板厚さ程度に抑えることができる。また、入力部は導波管であるためにPCM等電子管の大電力入力にも対応可能である。

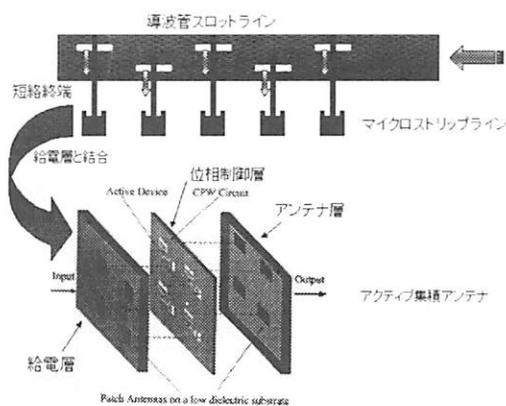


図2: 導波管スロット給電
アクティブ集積アンテナの概念図

2. 導波管スロット-AIA間の結合度向上

導波管スロット給電AIAにおいては、その電磁結合部における結合度の向上が非常に重要である。ここで言う結合度とは、導波管への透過電力に対してマイクロストリップ線路に結合する電力の比で定義される。結合度が不十分な場合、電力分配部における挿入損失が増大し、更には電磁結合部からの不要放射も多く発生することになり、AIAの放射パターンに悪影響を与える。従って、結合度を向上させることは導波管スロット給電AIAにおいて必要不可欠である。

この結合度向上に関しては、過年度にも当研究グループにおいて検討を行っており[2], [3], 電磁結合部パラメータの最適化を行った結果、リターンロスが-11.1dB、通過損失が-2.2dBであり、電磁結合部の結合度が約60%の結果を得ていた[3]。この結果では導波管への入力電力の内40%近くが空間へ漏れ出ていることになり、結合度としてはまだ不十分であった。一方、本研究で検討しているシステムと類似した導波管スロット-マイクロストリップ分配/結合器としては文献[4], [5]の例があり、1つの導波管スロット-マイクロストリップ結合部を解析して1/8の分配電力が結合するように設計し、これを8個従属接続して8分配器を構成したものであった。Xバンドの電力分配器・合成器[4]で結合度93%@10GHz(実験結果は78%)を得た報告がある。本研究では、電磁結合部の結合度90%以上に小型・軽量化を図ることを検討する。これを達成するため、導波管の広壁および狭壁寸法を適切に調整することで、インピーダンス整合を図りながら結合度改善を試みた。

電磁結合部の結合度およびリターンロスの向上に向けては以下の点を検討した。我々の従来の設計[2], [3]では、高インピーダンスであるスロットと特性インピーダンス50Ωのマイクロストリップ線路との整合を取る際に、マイクロストリップ線路をインピーダンスが低いスロット端部にオフセットさせたた

め、高インピーダンスなスロット中心が空間に露出し、そこから自由空間へ漏れ（放射）が発生し結合度を低下させていた。従って、スロットの放射インピーダンスを下げることで不要放射を抑えて結合度の向上を図ることができる。そこで、導波管の等価的な特性インピーダンスをマイクロストリップ線路の特性インピーダンスに近づけ、これによってスロットの放射インピーダンスを 50Ω 程度まで下げることが検討し、導波管を超偏平構造として実現した。また、スロットは半波長スロットで中心給電方式として、最もインピーダンスが高い半波長スロットの中心で整合を取ることで、電力の大部分がマイクロストリップ線路に結合し、不要放射も抑えられると考えられる。

次に、電磁結合部のパラメータについて説明する。電磁結合部のパラメータとしては、図3に示すように、マイクロストリップ線路のオープンスタブ長 L_m 、スロット長 L_s 、スロット幅 W_s 、マイクロストリップ線路のオフセット長 d_m 、マイクロストリップ線路幅 W_m 、誘電体基板の誘電率 ϵ_r 、および誘電体基板厚 h が挙げられる。一方、導波管スロット部に関しては、図4に示すようにスロットオフセット長 d 、導波管の寸法 a (H面)、 b (E面) が挙げられる。Port1 (導波管入力) から Port2、Port3 (マイクロストリップ線路) に電力が分配される。本解析では、導波管の a 、 b を調整する（偏平構造にする）ことでインピーダンス整合を容易とした。他のパラメータは、これまでの解析結果も考慮して最適な値をパラメータ解析で見出した。電磁界解析には、Ansoft 社の高周波電磁界シミュレータ HFSS を使用した。

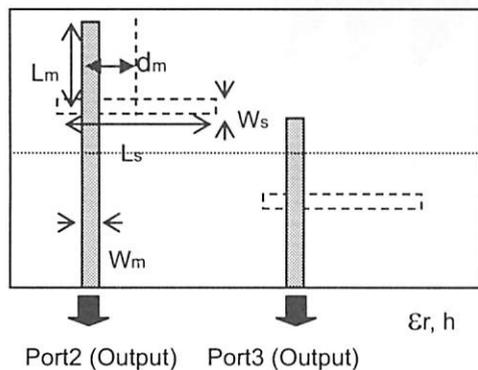


図3: 電磁結合部のパラメータ

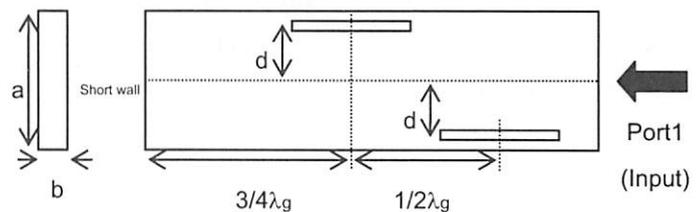


図4: 導波管スロット部のパラメータ

解析に当たって、まず導波管の断面寸法 a 、 b を決定した。これを決定するために、Stevenson, Oliner により導かれたスロットのコンダクタンスを与える式を用いた[6].

$$G_s = 2.09 \frac{\lambda_g}{\lambda} \frac{a}{b} \cos^2 \left(\frac{\pi \lambda}{2 \lambda_g} \right) \sin^2 \left(\frac{\pi d}{a} \right) \quad (1)$$

上式において、 λ 、 λ_g 、 a 、 b 、 d はそれぞれ自由空間波長、管内波長、導波管広壁寸法、狭壁寸法、スロットオフセット長である。自由空間へ放射する導波管スロットアンテナの設計では、スロットオフセット長 d を調整して導波管入力端でインピーダンス整合させるが、そのときスロットのインピーダンスは $500 \sim$ 数 1000Ω の値となっている（スロット数に依存）。この値で 50Ω のマイクロストリップ線路と整合を取ることは難しく、また不要放射の原因にもなっていた。そこで、スロットのインピーダンスが 50Ω 程度となるように、上式から a 、 b を求めた。その結果、 $a=40\text{mm}$ (5.8GHz 用規格寸法)、 $b=1.5\text{mm}$ とした場合を解析モデル1、 $a=30\text{mm}$ 、 $b=4.0\text{mm}$ とした場合を解析モデル2とした。 $a=40\text{mm}$ 、 $b=1.5\text{mm}$ とした場合の解析モデル1について電磁結合部の最適化を行った結果を図5に示す。周波数 5.8GHz において、 $S_{11} = -27.7\text{dB}$ 、 $S_{21} = -3.34\text{dB}$ 、 $S_{31} = -3.49\text{dB}$ であり、そのときの結合度は 91.3% となった。導波管の断面寸法を調整しなかった場合から大きく向上させることができ、ここでとった改善手法が有効であることが確

認められた。また、導波管部の狭壁寸法は従来よりも狭められたため、結果として小型・薄型化を図ることもできた。

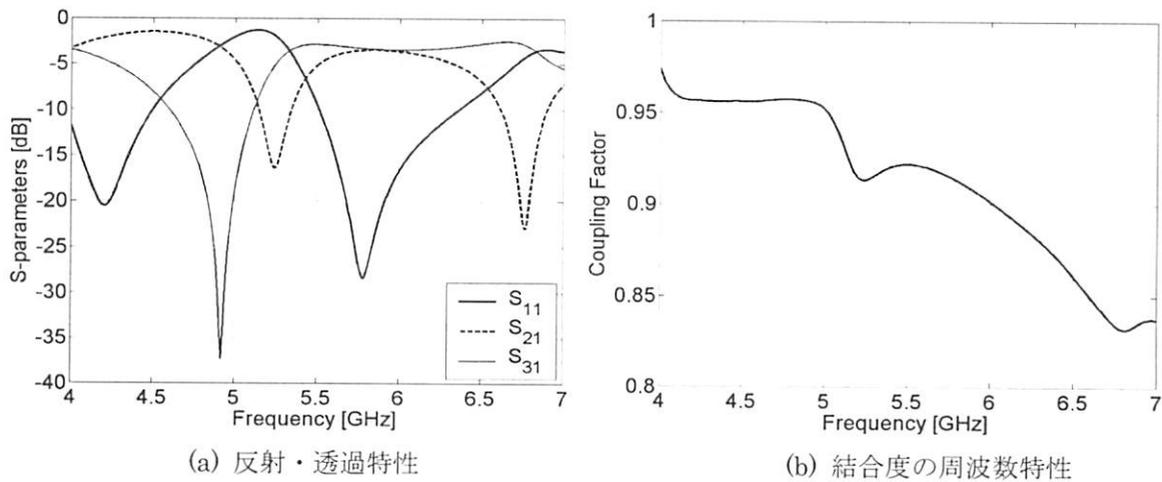


図 5: $a=40\text{mm}$, $b=1.5\text{mm}$ とした場合の最適化結果

3. AIA 用増幅器の検討

AIA 上に装荷する増幅器は、アンテナまでの最終段であるために高効率、高出力であることが求められる。また実用的な観点からは、AIA 平面アレイを素子間隔 0.7 波長四方で構成するための回路実装スペースを考えると、極力小型・軽量であることも要求される。本検討では、MMIC 化により小型化することを念頭に入れ、増幅器の基礎検討を行う。

ここでは、そのための原形ハイブリッド回路の試作を行った結果を示す。設計には、増幅素子として富士通製 FHX76LP を用い、誘電体基板には Arlon 社製 25N 基板(誘電率 3.38, 基板厚 0.762mm, 圧延銅箔の厚さ 0.018mm)を使用した。動作級は、利得と効率の両立のために AB 級とし、動作点はゲート電圧 $V_g=-0.4\text{V}$, ドレイン電圧 $V_d=2.0\text{V}$ (ソース接地)を選んだ。回路の設計には Agilent 社製の高周波回路シミュレータ ADS を用いた。

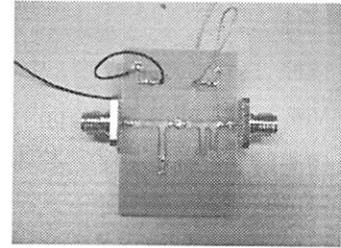


図 6: 試作した AB 級増幅器

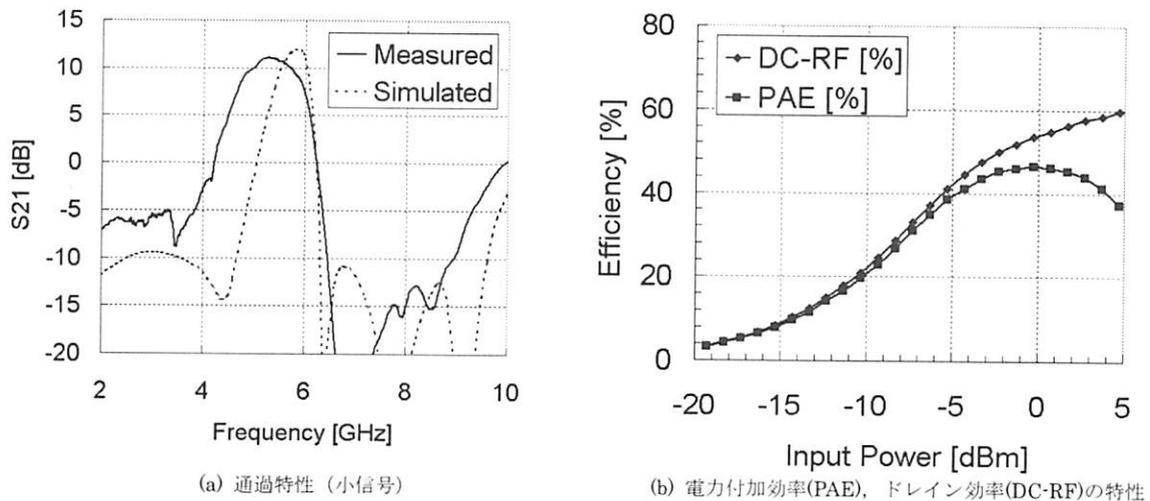


図 7: 試作した AB 級増幅器の特性

試作回路の写真を図 6 に、また測定結果とシミュレーション結果の比較、および効率特性の測定結果

を図7に示す。電力付加効率 (PAE) を測定した結果、約 47%を得た。大信号解析については、使用した FHX76LP の非線形モデリングの精度が未だ不十分であり、特に PAE に関しては大きな誤差の発生が見られた。このため、今後大信号モデルの精度に関して再検討が必要である。また、現段階では簡単な試作にとどまっており、今後、効率・出力の改善を図っていかなければならない。

4. まとめ

宇宙太陽発電システム実現のための高効率なマイクロ波エネルギー伝送システムとして、導波管スロット給電アクティブ集積アンテナの検討を行った。電力分配部の損失低減の課題に対して、導波管部位と電磁結合部の最適設計を行った結果、電磁結合部の結合度 90%以上、リターンロス-36dB 以下を達成した。今後は分配部試作による動作確認、多素子設計への拡張が課題である。増幅部の設計に関しては、今回は基礎検討として AB 級増幅器の設計を行った。今後、更なる高効率、高出力化を図り、MMIC 化を進める予定である。最終的には、導波管スロットと AIA 部を組み合わせ薄型平面アレイの実験を行い、熱問題、重量などの観点から評価を行う予定としている。

謝辞

アクティブ集積アンテナとマイクロ波エネルギー伝送の関わりに関しては、京大生生存圏研究所客員教授の川崎繁男教授に多大な示唆、助言を頂いた。また、導波管スロット-AIA 結合度向上に関する研究は、(株)三菱重工業殿との共同研究で行われた。

参考文献

- [1] 篠原 真毅, 三谷 友彦, 松本 紘, “位相制御型マグネトロンの開発研究”, 電子情報通信学会論文誌 C, Vol. J84-C, No.3, 2001, pp.199-206
- [2] 山本修作, 篠原真毅, 松本紘, “位相制御マグネトロンを用いたフェイズドアレイに関する研究”, 第5回宇宙太陽発電システム(SPS)シンポジウム, 神戸, 2002.11.07-08
- [3] 山本修作, 篠原真毅, 松本紘, “位相制御マグネトロンを用いたフェイズドアレイに関する研究”, 電子情報通信学会総合大会, 東北大学川内キャンパス, 2003
- [4] R. Bashirullah and A. Mortazawi, “A slotted-waveguide power amplifier for spatial power-combining applications,” IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 48, pp. 1142–1147, July 2000.
- [5] X. Jiang, L. Liu, S. Ortiz, R. Bashirullah, A. Mortazawi, “A Ka-Band Power Amplifier based on a Low-Profile Slotted-Waveguide Power-Combining/Dividing Circuit,” IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 51, no. 1, pp. 144-148, Jan. 2003.
- [6] A. A. Oliner, “The Impedance Property of Narrow Radiating Slots in the Broad Face of Rectangular Waveguide,” IRE Trans. Antenna Propagat., Vol.AP-5, pp.1-20, 1957.