

Microwave Engineering Study of Simultaneous Wireless Transmission for a Space Solar Power and Information-Communication System

Shigeo KAWASAKI¹, Harunobu SEITA¹, Shigeaki KAWAI¹, Takeshi YAMAMOTO¹,
Katsutoshi MAKAJIMA¹, Naoki SHINOHARA¹, Kozo HASHIMOTO¹, Shoichiro
MIHARA², Yuhtaro KOBAYASHI², Tatsuhito FUJITA³ and Masahiro MORI³

¹ Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University
Gokasho, Uji, Kyoto 611-0011, Japan

²Institute for Unmanned Space Experiment Free Flyer
Seika Building,2-12,Kanda-Ogawamachi Chiyodaku,Tokyo 101-0052 Japan

³Advanced Mission Research Center, Japan Aerospace Exploration Agency
7-44-1 Jindaijihigashi-cho, Chofu-shi,Tokyo,152-8522 Japan

e-mail : kawasaki@rish.kyoto-u.ac.jp

Abstract

The RF high power circuit technology used for a base station in a telecommunication system is also important technology in wireless power transmission systems such as SSPS. This high power circuit plays a role of conveyance of the power in the case of the wireless power transmission. In addition, it has a function of carrier for the signal modulation/demodulation. The same series of microwave devices are used in both cases. Hence, it is possible to operate the wireless power transmission with the telecommunication simultaneously. In this study, three types of Active Integrated Antenna arrays used semiconductor devices in the transmission part for the wireless power transmission system as well as for the space communication system are demonstrated with experimental results. Among them, 33.3 g/W was achieved in the high power AIA array with 120W. Further, consideration of the possible application of the high power circuit technology is explained for space use such as a communication satellite, a millimeter-wave sensor and a space propulsion combination.

宇宙エネルギー送電・情報通信

同時伝送システムのマイクロ波工学的検討

川崎 繁男、清田 春信、川井 重明、山本剛司、中島勝利、篠原 真毅、
橋本 弘蔵、三原 荘一郎[†]、小林裕太郎[†]、藤田、辰人[‡]、森 雅裕[‡]

京都大学生存圏研究所 〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄

[†] 無人宇宙実験システム研究開発機構 〒101-0052 東京都千代田区神田小川町 2-12

[‡] 宇宙航空研究開発機構高度ミッション研究センター 〒152-8522 東京都調布市深大寺東
町 7-44-1

E-mail: kawasaki @rish.kyouto-u.ac.jp

1. はじめに

クリーンエネルギーや地球温暖化防止に向けた宇宙利用の試みとして、文部科学省等による宇宙太陽発電システム (SSPS) がある[1],[2]。また、最近では、この SSPS の地上応用として、山頂や離島への無線送電、他の衛星への送電、検査ロボットへの給電を行う、マイクロ波無線電力伝送が経済産業省等より提案されている[3]。しかし、これら無線送電は、大電力送電のため、特に宇宙用途としては、重量増加と大型化、適用技術の高信頼性、利用周波数の割り当て等が早急に解決すべき課題となっている[4]。

また、近年の通信システムの発達により、6GHz 以下のマイクロ波周波数の逼迫が叫ばれて久しい。総務省が公表した「周波数の再編方針」においても、平成 20 年までに移動通信システムに約 330~340MHz 幅、無線 LAN に最大で約 480MHz 幅の周波数帯が必要であると謳われている。このような移動通信システム及び無線 LAN 等に大幅な周波数帯域幅を新たに確保するための手段の一つとして、6GHz から 30GHz までの周波数帯 (高マイクロ波帯) を移動体や衛星通信に積極的に利用しようとする提案がなされた。

これらの無線送電と情報通信システムを実現するためには、未利用周波数帯の利用と送受電・送受信システムの小型・軽量・多機能化が必要である。これらに対する具体的な技術課題は、低廉化な小型・軽量・高出力アクティブフェーズドアレーアンテナ(APAA)を作製することである[5]。すなわち、マイクロ波機器の薄型・軽量化と多機能化の要求を満たす要素技術として、小型アンテナと集積回路を低廉化で実現する融合技術が必要となってくる[6]。この要求に対処できる技術として、アクティブ集積アンテナ(Active Integrated Antenna: AIA) 技術がある[7-10]。そして、無線電力伝送や APAA を用いた情報通信のマイクロ波送信部の小型・軽量・高出力化の主要素子のひとつは、高出力アンプである[11]。MMIC や基板の積層化技術を用いれば、小

型・軽量化は実現可能である[12]が、そこで発生する熱が問題となる[13]。筆者らの研究では、AIA の高出力小型化を進める一方で、AIA の廃熱機構を効率的に行うことについても検討を行ってきた[14]。

このような状況の中、半導体デバイスを用い、廃熱機構を組み込んだ3種の小型・薄型高出力 AIA アレーの試作を行った。それぞれ、送電用高出力 AIA アレー、送電用超薄型高出力 AIA アレー、および、通信 APAA 用高出力 AIA アレーの各高出力 AIA アレーを紹介し、その地上・宇宙利用について検討する。

2. 構成および試作

2. 1 ユニットパネルの構成

本研究での送電・送信用高出力アンプ AIA アレーは、発振源からのマイクロ波入力を分配し、FET を用いて増幅し、アンテナから放射するというものである。各コンポーネントとそれらの機能ブロック図を、図 1 に示す。この中で、周波数変換器と前段アンプは、MMIC 技術を用いることで、小型・軽量化することができる。また、FET 回路動作レギュレータ電源回路と高出力回路は、熱の発生源となるため、廃熱のための冷却系を、アンテナ・回路を集積化した AIA とともにパネル化し、全体をコンパクトにする。アンテナは、AIA の一部として、MMIC と相性のよい薄型・軽量の平面パッチアンテナを採用した。

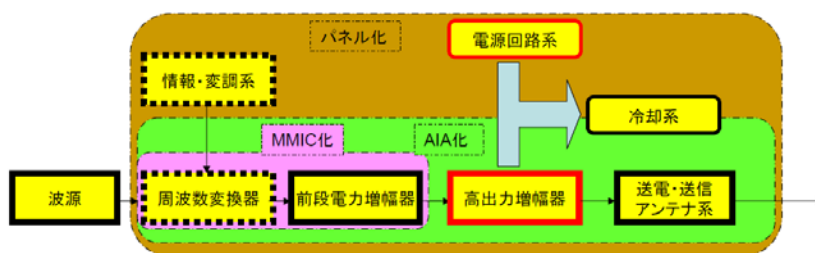


図1 ユニットパネルの構成

2. 2 AIA アレーの試作

(1) 送電用高出力アンプ AIA アレー

小型化のため、送電用高出力アンプ AIA アレーでは、2系統3段アンプを高密度に配列した。さらに、立体的なスペース利用のため、筆者らの研究グループで研究を行っている折り曲げ基板を使用した。また、増幅の最終段では、大きな電力が必要になることから FET の発熱が問題となると考えられるため、折り曲げ基板を使用して AIA 内にダクト用のスペースを設け、ファンで空冷する廃熱機構をアレーの中に集積した。高密度に配列した折れ曲がり基板使用の2系統3段増幅回路に、矩形パッチアンテナを結合させて試作した2x2AIA アレーを、図2に示す。これに基づき、送電用高出力アンプ32素子 AIA アレーを試作した。これは、高出力 AIA アレーとして、アレーの素子数を32とし、一素子あたりの出力4W、総電力を120W程度とした5.8GHzのマイクロ波を放射する AIA アレーである。

(2) 送電用超薄型高出力アンプ AIA アレー

図 1 に示された電氣的な AIA 基本ユニット構造を用いて、2x2 アレーをテフロン樹脂系のソフト基板上（比誘電率 2.6）に作製した。先に述べたように SSPS 送電部用 AIA アレーとしては、高密度実装と廃熱機構が必要である。アンテナ・RF 回路・レギュレータ回路に加え、移相器もボード化して、積層し、薄型構造で実現する必要がある。この送電用超薄型高出力アンプ AIA アレーでは、廃熱機構としてヒートパイプを用いて、熱移送を行うこととした。ヒートパイプをレギュレータ回路と RF 回路の間にサンドイッチしたヒートパイプによる廃熱機構付 2x2AIA アレーを試作した。これを図 17 に示す。厚さは、元来、ヒートパイプアダプタ挿入分を考慮していたので、20mm である。

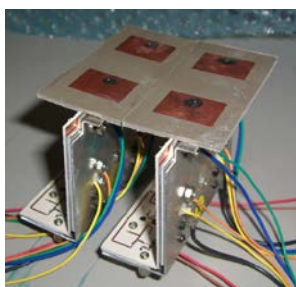


図 2 2 系統 3 段増幅回路による 2x2AIA アレー

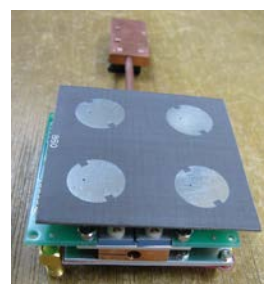


図 3 超薄型 AIA アレー

(3) 通信 APAA 用高出力アンプ AIA アレー

2 段アンプを折り曲げ回路基板を使用して高密度に配列した 2 系統 2 段アンプを試作した。これに、円偏波用円形パッチアンテナを結合させ、通信 APAA 用高出力アンプ AIA アレーの基本ユニットを試作した。2 素子 AIA アレーを図 4 に示す。この AIA は、将来の APAA への発展を目指して、折れ曲がり回路を増幅部と位相制御部の 2 段とし、それぞれ回路基板は L 字型、コの字型で形成した。本試作では、コの字型折れ曲がり基板位相制御部は、将来はアップコンバータと小型移相器を挿入する予定であるが、今回はマイクロストリップ線路のみで構成している。このアレーを用いた変復調送受信実験の様子を、図 5 に示した。

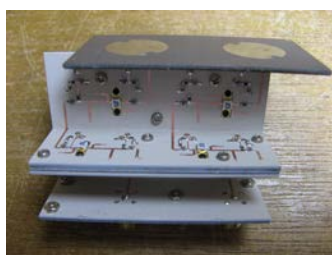


図 4 通信 APAA 用 AIA アレー



図 5 変復調送受信実験

3. 検討

3. 1 小型・軽量化と廃熱

SSPS 送電部では、小型・軽量化のため、薄型のパネル構造をもつサブアレーで構成することが望まれている。このため、基本ユニット積層化により、薄型・軽量化を目指す必要がある。本研究ではモジュールを平面回路で集積化し、それらを積層化や立体構造により高密度に実装する

ことを提案する。この基本方針に基づいて、今回試作した3種類の高出力アンプ AIA アレーの厚みを比較した。送電用高出力アンプ 32 素子 AIA アレーでは 12cm、送電用超薄型高出力アンプ 8 素子 AIA アレーでは、2.0cm、通信 APAA 用高出力アンプ 16 素子 AIA アレーでは移相器とアップコンバータのスペースを含んで 4.7cm であった。

3. 2 宇宙エネルギー送電・情報通信同時伝送システムへの展開

今回報告した高出力アンプ AIA アレーに高性能・低コスト移相器を装荷することにより、宇宙や地上での無線エネルギー送電・情報通信システム用 APAA への発展を期待するところである。さらに、この APAA の発展性については、周波数の有効利用の観点から、APAA を用いた無線エネルギー送電・情報通信同時伝送システムの開発が望ましいように思える。これらのシステムに対する技術的要求として、機器のさらなる小型化や小型アンテナでも狭ビームが得られ、漏話の少ないピンポイント通信の要求に、ミリ波技術の利用が有望である。これは、未利用周波数の開拓という観点からも重要であるので、これを APAA に用いた、宇宙および地上での無線エネルギー送電・情報通信ミリ波同時伝送システムの開発も視野に入れる必要がある。

SSPS は、エネルギー問題と地球温暖化防止との両方の要求から提案されたシステムであり、クリーンエネルギー源のひとつとして、非常に有望であるが、これに付加価値をつけるためにも、巨大宇宙機の宇宙エネルギー送電および宇宙通信への利用と宇宙推進との共存を考慮すべきである。宇宙での利用に特化すれば、自給自足発電している衛星や宇宙観測用センサーへの給電・通信、宇宙での送電・送信の利用（宇宙大規模発電所からの無線電力配分）、プラズマイオンエンジンによる宇宙での発電電力の他の衛星への送電、ソーラー・磁気セイルといった宇宙エネルギー推進との融合を提案したい。これらには、推力となるエネルギーを直接無線送電電力に利用するほかに、その巨大な構造を利用して、巨大送電用アンテナに利用することも含まれる。

SSPS に代表されるような巨大な宇宙機の組み立てロボットへの無線電力送電を作業コマンドや組み立て現場情報といっしょに伝送すれば、作業効率は極めて高くなると考えられる。作業ロボットへの送電は、地上でのデモンストレーションともなり、宇宙技術のスピノフ技術として、災害救助ロボットへの無線送電応用があげられるが、被災現場の最新情報取得を同時に行えるシステム実現の基礎とすることができる。

地球温暖化防止の対策のひとつに、小型通信機や小型センサーへの無線電力伝送は、それらのバッテリーレス化が可能となり、寿命終了後のそれらの放置による環境汚染対策にも、功を奏するように思える。電力を消費している通信機器類への電力伝送と、情報機器への情報伝送を一度に行うことにより、周波数の有効利用の促進と必要な電力のみを供給するという究極の電力マネージメントを達成できる可能性が大である。ここでは、送電電力の非効率や通信漏洩の低減等の対策が重要となるが、これには、先に述べたミリ波帯での無線エネルギー送電・情報通信同時伝送システムが有望であると考えられる。

4. まとめ

本稿では、情報通信の分野で、基地局などに用いられていた高出力回路の技術を用いた無線エ

エネルギー送電・情報通信同時伝送システムの実現性に関して、マイクロ波工学的な立場から解説した。SSPSにも適用可能な無線電力送電と宇宙機情報に関する通信を同時に行える半導体デバイス・集積回路・AIAアレーを用いた送電・送信部の検討を、120W級高出力送電用、ヒートパイプ冷却方式超薄型高出力送電用、および、FSK変復調方式通信APAA用の3種類のAIAアレーの試作結果とともに示した。冷却方式として、折れ曲がり回路を用いた空冷方式とヒートパイプによる熱移送方式を示した。各AIAアレーにおいて、最大 33.3g/W、薄さ 2cm、BER 10^{-6} 以下を達成した。これらにAPAAへの発展性を加えて、宇宙および地上での無線エネルギー送電・情報通信同時伝送システムに対しての検討も行った。地球温暖化防止を加味したハードウェアの小型化や狭ビームの観点から、ミリ波利用の可能性にも言及した。

謝辞

本研究の推進にあたり、宇宙研佐々木進教授、高野忠教授、風間保裕研究員、JRC 須田保課長、京大生存研山川宏教授の各位に対し、有益なディスカッションやアドバイス、そして、試作へのご協力をいただいたことに感謝いたします。なお本稿は、送電用高出力アンプ 32 素子 AIA アレーの研究においては(財)機械システム振興協会が日本自転車振興協会の競輪の補助金の交付を受け、その財源を元に(財)無人宇宙実験システム研究開発機構が受託した事業の研究助成、また、通信 APAA 用高出力アンプ 16 素子 AIA アレーの研究では、総務省電波資源拡大のための研究開発「高マイクロ波帯用アンテナ技術の高度化技術の研究開発」の研究助成、さらに、送電用超薄型高出力アンプ 8 素子 AIA アレーの研究では宇宙航空研究開発機構「廃熱構造を持つアクティブ集積アンテナアレイパネルの試作と熱設計に関する調査検討」の各研究助成により行った成果をまとめたものである。

参考文献

- [1] S. Kawasaki, Y. Kido and T. Takano, "Laminated Active Integrated Amplifier Antenna Arrays for a Space Solar Power Satellite", IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol.47, Sep. 1999, pp.1901-1909
- [2] K. Nanokaichi, N. Shinohara, S. Kawasaki, T. Mitani and H. Matsumoto, "Development of
- [3] 高野忠, 川崎繁男, 年吉洋, 池田博一, 風間保裕, "実用的な能動形フェーズドアレーアンテナの研究開発計画", 電子情報通信学会総合大会, 3, 2007
- [4] J. M. Yang, Y. Chung, M. Nishimoto, M. Battung, A. Long, P. Chang-Chien, K. Tornquist, M. Siddiqui, and R. Lai, "Wafer Level Integrated Antenna Front End Module For Low Cost Phased Array Implementations", IMS2007, June 2007, pp.1879-1882.
- [5] J. Lin, T. Itoh, "Active Integrated Antennas", IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. 42, No. 12, Dec. 1994, pp. 2186-2194.
- [6] S. Kawasaki, "High Efficient Spatial Power Combining Utilizing Active Integrated Antenna Technique", IEICE Trans Electron. Vol. E80-C, No. 6, Jun. 1997, pp. 800-805.
- [7] S. Kawasaki, "A High Power Active Integrated Antenna Incorporated with Heat Sink Mechanism", 384838, EuCAP06, France, November 2006.
- [8] K. Nanokaichi, S. Kawasaki, N. Shinohara, H. Matsumoto, M. Mori, Y. Hisada, and H. Kagawa, "A Thin Unit Panel with Layered High-Power Active Integrated Antenna for Space Solar Power System," 56th International Astronautical Congress, Proceedings IAC-05-C3.P.08, Fukuoka, Japan, Oct. 2005.
- [9] 清田春信, 金沢享二, 仁木洋平, 中島勝利, 川崎繁男, "折れ曲がり基板を用いた増幅回路の試作", 電子情報通信学会総合大会, 3, 2007.