

The Projected Development of an Active Phased Array Antenna (APAA) and Its Extension to an SPS Spacetenna

Tadashi TAKANO †**, Yasuhiro KAZAMA †, Kazuhiro IKEDA †, Shigeo KAWASAKI* †, Hiroshi TOSHIYOSHI † † and Tamotsu SUDA**

† Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency 3-1-1 Yoshinodai, Sagami-hara 229-8510 Japan

* Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University Gokakusho, Uji 611-0011, Japan

† † Institute of Industrial Science, The University of Tokyo 4-6-1 Komaba, Meguro-ku, Tokyo 153-8505, Japan

* * Research and Development Division, Japan Radio Co.,Ltd. 5-1-1 Shimorenjaku, Mitaka 181-8510 Japan

E-mail: †takano@isas.jaxa.jp

Abstract

An Active Phased Array Antenna (APAA) has been used for a radar due to the agility in beam control and the distributed allocations of active devices in the antenna. Recently it is conceived that the APAA can be applied to mobile and satellite communications. Accordingly, the research and development of APAA has been carried out in a project for the purpose of general and commercial applications. The above-mentioned advantages of APAA could be also used for solar power satellite (SPS). The former half of this paper is devoted to describe the outline of this project and the achievements. The latter half presents the extension of APAA to be utilized as a microwave transmitting antenna aboard an SPS, or a spacetenna. The radiation characteristics, the connection with active circuits, and thermal and mechanical characteristics are investigated in the extrapolation manner considering the parameters of frequency, electric power and scale.

能動位相配列アンテナ APAA のプロジェクト開発と SPS スペーステナへの拡張

○高野 忠†** 風間 保裕† 池田 博一†
川崎 繁男*† 年吉 洋†† 須田 保**

† 宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部 〒229-8510 相模原市由野台 3-1-1
* 京都大学・生存圏研究所 〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄
†† 東京大学 生産技術研究所 〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1
** 日本無線 (株)・研究開発部 〒181-8510 東京都三鷹市下連雀 5-1-1

1. まえがき

能動型位相配列アンテナ Active Phased Array Antenna (APAA) は、従来から高性能レーダに用いられてきた。APAA を太陽発電衛星 Solar Power Satellite (SPS) の電力送出用アンテナ (スペーステナ) に用いることは、SPS 提案の初期から考えられていたが[1]、パラボラアンテナ系に比べて、次のような問題があることが指摘されていた。i) 素子数が極端に多いので給電系が複雑で損失が大きくなる、ii) 大きく重い、iii) 値段が高い[2]。

それに対し近年、APAA を移動体や衛星通信に利用する動きがある[3]。これに応じて我々は、Ku 帯で APAA の一般商用化を目指して、プロジェクトにより研究開発を進めている[4]。APAA アンテナは、その放射ビームの多能性と能動回路の分散配置に、特長がある。これらは、2.45 GHz における SPS のスペーステナにも生かされる。

本稿の前半では、本プロジェクトの概略を説明する。後半では APAA を SPS に応用する場合、特徴や技術課題を明らかにする。

2. APAA プロジェクトの概略

APAA の一実現形態を図 1 に示す。放射素子に近接して、送受分波器を通し送信と受信の回路が配置されている。回路は個別部品も多く大きいため、基板上に並べられて一つの箱形モジュールになる。このモジュールを素子数だけ並べてアレーアンテナとするため、アレーアンテナの厚みはこのモジュールの寸法で決まる。

プロジェクト全体の目標は、この APAA を従来の 1/10 以下の低価格で、かつ薄型構造 [5] で実現することである。それを実現する具体的基盤技術は、次である。

- (1) 間引き給電[6]により、放射素子の半分のみ給電し、残りは空間的結合で励振する。
- (2) 高い周波数で性能が優れる MEMS スイッチを開発する。
- (3) LTCC (Low Temperature Co-fired Ceramics) による高密度 RF 実装技術を開発する。
- (4) それらを用いた移相器、MMIC マイクロ波デバイスを開発する。
- (5) アンテナ・回路の融合技術を開発する。

これらの研究要素に対応して、研究グループを組織し、R&Dを進めてきた。表 1 は、その体制と役割分担を示す。計画は 2006~9 年の 4 年にわたる。極めて斬新な要素が多いため、前 2 年は研究を、後 2 年は開発を主にして、各々遂行することにした。

3. 開発された APAA

3.1 各部品の概略

周波数は 12.5GHz である。従ってアンテナ放射素子や間隔は、半波長 12.0mm が基本である。ここでアンテナ背面に設置する低雑音増幅器 LNA や移相器は、給電する放射素子の間隔内に収める必要がある。図 3 は間引き給電アレーの構成を示すが、給電素子間隔は放射素子の約 2 倍あるので、給電部品に対し全数給電の 2 倍の空間を提供する事ができる。

放射素子は、間引き給電しやすい高姿勢ダイポールを採用することとした。この素子をアレー化した時の全体パターンは、図5のように仰角45度方向に最大値を有するペンシルビームとなり、衛星通信の車載用端末に最適なものである[8]。

4ビット移相器は、規準伝送線8本とスイッチ8個で構成される[9]。その全体寸法は、8.0 x 8.0 mmである。スイッチは高い周波数で損失を軽減するため、RF-MEMS技術で作っている。双極双投型を開発し、2スイッチを同一パッケージに収めた[10]。MEMSは機械的スイッチのため、動作速度が遅い。スイッチ駆動回路は、MEMSスイッチを駆動する70V信号を生成する。そのため、高耐圧CMOSで構成する。寸法は、7.0 x 7.0 mmである。

LNAも小型パッケージを開発し、5.0 x 5.0 mmである。大電力増幅器HPAは、チップ寸法1.0mm x 1.0mmで、5.8GHzにおいて出力339mW、能率41%である。

3.2 実際の実装状態

図11(a)は、アレーアンテナ実装モデルの一部(16素子)を取り出したものである。第1層に両偏波用放射素子を、第2層の裏面に16個のLNAを、第3層表面に移相器、裏面に制御回路を、各々載せている。LNAと移相器、移相器制御器は、放射素子間隔の2倍に比べ、小型にできたため、規則的に配列できた。

このサブアレーを図11(b)のように、六角形に並べて243素子の実装モデルアンテナとする。その最大寸法は240mmであり、アンテナ先端までの厚さを30mmに収まっている。

4. SPSのスペースステナへの拡張性

4.1 放射特性とサブアレー構成

スペースステナの放射特性としては、同一面積においてなるべく主ローブを絞り、かつ副ローブを低くする事が命題である。従って、レーダで使われているシニングあるいはsparse array技術は、広い面積を必要とするので得策ではない[7]。そのため全放射素子に給電するか、等価的に全数給電する(間引き給電)ことが、必要である。副ローブの中で最も都合悪い量子化ローブが、生じない条件の基で比較すると、同じアレー面積に設置される素子数は、三角配列の方が四角配列より少なく済むという結論が得られる。

ビーム走査はAPAAの最も大きい長所であるが、SPSでは衛星の微小な姿勢変動や大気屈折率分布によるビーム移動に対処するだけにする。地球上レクテナ間の切り替えは衛星の姿勢制御により、また異常状態への対応は後述のようにビームの拡大により、各々対応する。すると、ビーム走査範囲は、ビーム幅 $\Delta\theta$ の数倍で済む。従って素子間の位相差 $\Delta\phi$ は、仮に $\Delta\theta$ だけ走査する場合、次式の小さい値で済む(Nscanは走査方向の素子数)。

$$\Delta\phi = 2\pi / N_{\text{scan}}$$

大形アレーアンテナを作るに当たり、本APAAプロジェクトで採ったように、まず同一形状のサブアレーを作り、次にサブアレーをつなぎ合わせる方法が有効である。これは生産のみならず試験や運用上も、利点が多い。また間引き給電は、サブアレーの簡略化、低廉化に役立つ。

ただしサブアレー分割や前述の間引き給電により電界分布に周期性が生じると、量子化ローブが発生する。これらの周期性を抑制する設計指針が、APAAプロジェクトで開発されたので流用する[12]。

4.2 給電法と回路構成

アレーアンテナの給電回路の構成例を、模式的に図13に示す。原発振器の周波数として低い中間周波数(IF、612.5MHz)を用い、4通倍し放射周波数(2.45GHz)とした後、HGAで増幅し放射素子に給電する。種となるIFを分けて励振増幅器(DA)により増幅し、サブアレー単位で供給する場合、サブアレーの位置により増幅段数が異なる。従ってDAの数は、分配比と共にサブアレーの位置とも関係する。移相器は低いIFなので、伝送路切り替え型ではなく、アナログ型の集中常数型が適する。

全体の電源とDA、分配回路は、第1基板上に置く。移相器と通倍器は第2基板の裏側、HPAと放射素子は第2基板の表側に、各々実装する。

4.3 寸法と重量

軌道上実証用SPSとして、スペースステナ開口1500 x 1500 mmを仮定する。これは図12のように、20mm厚さの板状アレー9枚で実現できる。一構成案が図12であるが、収納時は500mm

四方、400mm厚さの構造物となる。

展開した構造物は、太陽光や内部発熱による温度分布、機械的振動などにより、平面度が劣化する。その時位相誤差は等価的に $\lambda/20$ 程度にする必要があるが、APAAの特長を生かして、上記変動分を能動的に補正することが考えられる。

上記寸法の三角配列で、かつxとy方向のビーム幅が等しくすると、次の諸元となる。

x方向素子数 = 13, y方向素子数 = 16, 全素子数 208、給電素子数 104。

重量は次の主要サブシステムについて、積算して求める。数字は個数を表す。

原発振器：1、励振増幅器：未定、移相器：104、通倍器：104、HPA：104、放射素子：208、基板：2、構造体および展開機構：図12。

4.4 発熱対策およびシステム異常への対応

HPAは放射素子に直結することも可能である。その場合地球に向けた面に配置するので、太陽光に曝されることになる。従ってその材料としては、200°C程度まで耐えることが必要になる。移相器と通倍器、DAなどは、基板裏側以降に配置するので、その熱条件はHPAより緩い。

スペースステナの電力はビーム状でレクテナに向けられているが、システム異常状態では、ビームが望ましくない方向に向いたり、周波数が許されていない領域に飛ぶなどの、故障モードが考えられる。従って、システム自身および周囲環境の安全のため、対策を施す必要がある。

発生したマイクロ波を宇宙空間に散逸させるため、ごく狭いビームから瞬時に拡大させる方法が提案された[12]。APAAの位相分布を、一様分布から球面状分布に切り替えるのである。

5. まとめ

プロジェクトで進めているKu帯のAPAAは、形が見えてきた。これをSPSのスペースステナに適用する場合、次の技術が流用できる：(1)層状構成、(2)間引き給電、(3)量子化ローブ抑圧したサブアレー構成法。

ただ考え方を変えるべき点、あるいは新たに考えるべき点も、次のようにある：(1)種周波数の分配・通倍法、(2)中間周波数による伝送、(3)移相器構成、(4)APAAの折りたたみ構成法。これらを考慮に入れて、今後具体的な設計を行う必要がある。

謝辞

論文前半で述べた本プロジェクト研究は、総務省委託研究「高マイクロ波帯用アンテナの高度化技術の研究開発」により進めている。

文 献

- [1] NASA CR 3393, 1981.
- [2] T. Takano, A. Sugawara and S. Sasaki, "System Considerations of Onboard Antennas for SSPS", The Radio Science Bulletin, No.311, pp.16-20, December, 2004.
- [3] 総務省報道資料、「中長期における電波利用の展望と行政が果たすべき役割」、2003年7月30日。
- [4] T. Takano, S. Kawasaki, H. Toshiyoshi, H. Ikeda and Y. Kazama, "The R&D of Active Phased Array Antennas with Significant Cost Reduction and Usage Convenience", ISAP07, 4B3-3, Niigata JAPAN, 2007.
- [5] A. Stark et al., "SANTANA -Advanced Electronically Steerable Antennas at Ka - Band", The Third EuCAP, Berlin, November 2008,
- [6] M. Okumura et al., "Theoretical and Experimental Study on a Partially Driven Array Antenna with Simplified Dipole Elements", IET Microwaves, Antennas & Propagation, Vol.2, No.7, pp696-703, March 2008.
- [7] G. Toso et al., "Sparse and Thinned Arrays for Multiple Beam Satellite Applications", The Second EuCAP, Edinburgh, UK, November 2007, Th2.2.6.
- [8] Y. Kazama, A. Sugawara, T. Takano and D. Radenam, "Novel Phased Array Antenna with Elements of Conical Beam Patterns", IEEE AP-S, 2008.
- [9] D. Yamane, T. Yamamoto, K. Urayama, K. Yamashita, H. Toshiyoshi, and S. Kawasaki,

"A Phase Shifter by LTCC Substrate with an RF-MEMS Switch," in Proc. 38th European Microwave Conference (EuMC 2008), Amsterdam, Netherlands, Oct. 27-31, 2008.

- [10] D. Yamane et al., "A 12-GHz DPDT RF-MEMS Switch with Layer-wise Waveguide/Actuator Design Technique," in Proc. 22nd IEEE Int. Conf. on Micro Electro Mechanical Systems, Jan. 25-29, 2009, Sorrento, Italy.
- [11] S. Kawasaki, "A High Power Active Integrated Antenna Incorporated with Heat Sink Mechanism", 384838, EuCAP06, France, November 2006.
- [12] T. Suda, T. Takano and Y. Kazama, "Practical Active Phased Array Antenna in the Assembly of Sub-arrays with Partial Drive Technique", ISAP2009, pp. 640-643, Bangkok, October 2009.
- [13] 高野忠、風間保宏、"SPS 異常事態へのマイクロ波送電アンテナにおける対処法"、SPS シンポジウム、2008年9月18日。

表 1. プロジェクト構成と担当

| グループ | 担当 |
|---------------|----------------------|
| 宇宙航空研究開発機構 | 放射素子、アレー構成、MEMS 制御回路 |
| 京都大学 | MMIC アンプ、移相器 |
| 東京大学 | RF-MEMS スイッチ |
| 日本無線 Co., Ltd | アンテナ実装、応用システム |

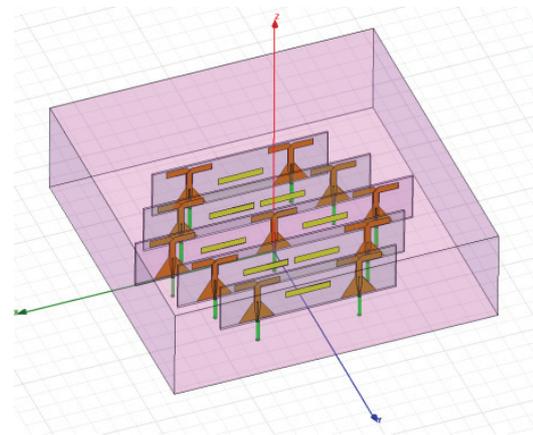


図 2 放射素子形状と間引き給電のための配置

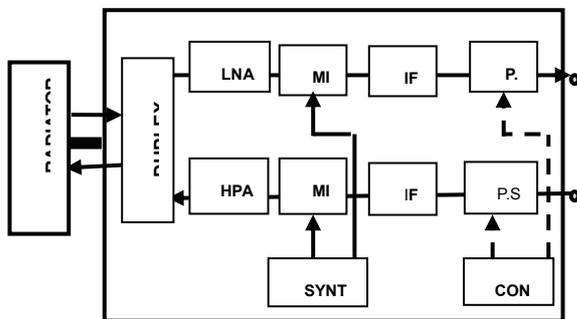


図 1 従来の APAA 構成 (1 モジュール分)

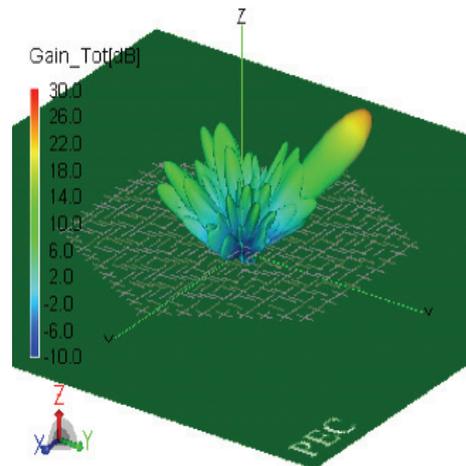
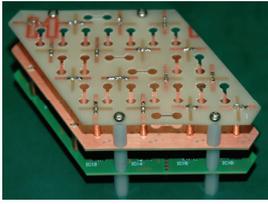


図 3 243 素子アレーアンテナの放射パターン (計算値)



(a) サブアレー



(b) アレー全体の外観 (1 サブアレー除く)

図4 243 素子アレーアンテナの実装モデル構成

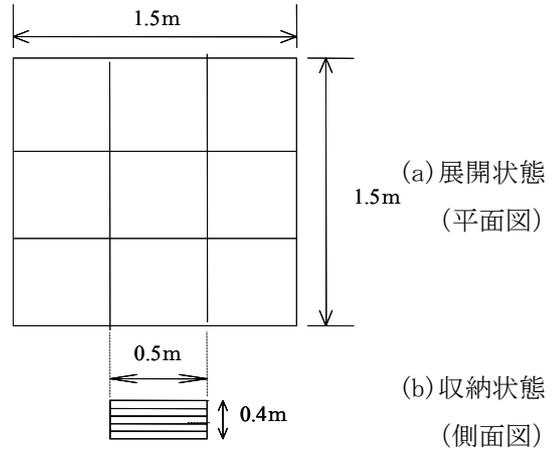


図5 配列用平面の展開法

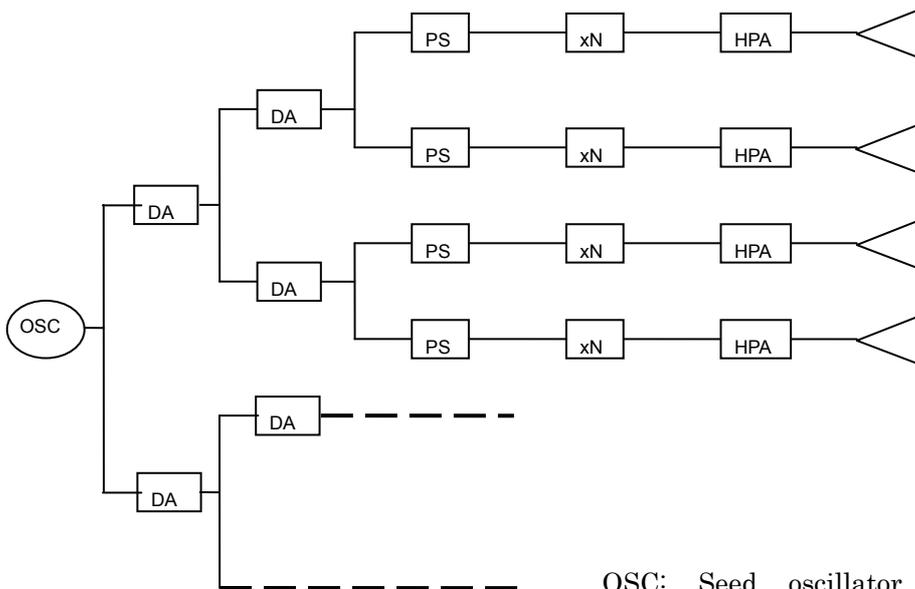


図6 APAA 形スペーステナの回路構成

OSC: Seed oscillator, DA: Driving amplifier, PS: Phase shifter, xN: Nth multiplier, HPA: High power amplifier