

SPS2000への応用を目指したパッチプレートアレイ型 アクティブ集積アレイアンテナ

川崎 繁 男*

A Patch-Plate Array Type of Active Integrated Array Antenna for SPS2000

By

Shigeo KAWASAKI*

Abstract : In this report, topics of an active integrated antenna for the spacetenna of SPS2000 system are described. These involve a basic concept and introduction of the active integrated antenna and a design concept, and experimental results of a unit cell and the unit patch-plate of the multi-layered active integrated antenna arrays. In this research, the unit cell of the multi-layered active integrated amplifier antenna was achieved with 50 g per 1 W. For much higher output power, a double-stage FET amplifier configuration was tested in the unit cell of the array. Further, for reduction of unexpected radiation from the antenna, use of the photonic band-gap structure in the substrate of the unit cell was also demonstrated.

概 要

本報告では、SPS 2000 スペーステナ用アンテナとしてのアクティブ集積アンテナの基本的な特徴や種類について述べる。さらに積層型アクティブ集積アンテナの基本コンセプト、ユニットパッチプレートとそのアレイ等の試作結果を報告する。この中で積層型アクティブ集積アンテナにおいて1素子当たり1W出力で50gを実現した(50gpW)。また、高出力化のために二段増幅器を搭載し、ユニットセルにおいて数Wを出力できる構成や、アンテナ基板からの不要放射対策としてフォトニックバンドギャップ(Photonic Band-Gap: PBG)構造を用いるアイデア等も示した。

重要語 : スペーステナ, アクティブ集積アンテナ, PBG, 平面積層型レーダ

*東海大学電子情報学部 電気電子工学科

1. はじめに

年々深刻化する環境問題の対策の重要性がさげられる中、新しいエネルギー資源の開拓は、この数十年の間、各方面で議論されてきた。特に、燃焼を伴わないクリーンエネルギー利用の開発が脚光を浴び、風力や太陽エネルギー利用の研究に拍車がかかった。このような状況において、文部省宇宙科学研究所を中心として、宇宙エネルギー利用の立場から太陽発電衛星SPS 2000が提案された。このシステムは、4つのワーキンググループに分かれて研究が進められてきたが、我々の研究グループは、そのワーキンググループのうち、衛星システム構築・太陽電池に関する宇宙科学研究所のタスクチームと連携をとり、衛星に搭載される送信アンテナ「スペーステナ (Spacetenna)」に関して共同研究を行ってきた。

1993年に出版された「SPS 2000 概念計画書」[1]によれば、スペーステナに対する要求は、SPS概念計画書[1]によると、アンテナ素子数は約250万個、太陽電池電源電力16 MW、アンテナ総出力10 MW、素子間隔南北方向0.742 m、東西方向0.612 m、である。これが、一辺336 m×高さ303 mの正三角柱の形状をした太陽発電衛星SPS 2000の一側面(132 m×132 m)に設置されるように計画された。ここで注目すべきことは、ペイロードの問題である。そのため、多機能・軽量化は重要なポイントであった。またこれまでに、これらの仕様のもと、送信アンテナがすでに試作されている[2]。

しかし、年月の経過とともに要求内容も変化し、電力ビジネスという観点から電力供給の低コスト化が必須とされ、これにともない、解決すべき問題のひとつにSPS 2000 総重量の低減が重要な課題として報告された。アンテナ1素子あたりの重量を送信出力1ワット(1 W)に換算した値を定義すると、10 g/W (= 10 gpW)以下を目標値としなければならない。ただし、gpWとは1Wあたりのグラム数とする。また、送信ビーム制御のポイントとなる技術として、レトロディレクティブ(地上から衛星へのパイロット信号到来方向に応答波を返す)機能を簡易な構造で実現することが必要であるとの認識も高まった。さらに、多機能衛星の観点から、電力送電という単一機能で運用することに加え、通信機能やデブリ監視機能等をもつ衛星としても視野にいれることが考えられた。

筆者の研究グループはこれらの要求を満足させる技術のひとつとして、機能の集積化が可能な、アンテナと回路を一体化する技術、アクティブ集積アンテナ技術を用いることを提唱し、この技術を用いてスペーステナの原形モデルを試作してきた[3]。アクティブ集積アンテナ技術を用いたスペーステナ原形モデル試作のポイントは、高出力・軽量化と多機能化の実現にあるので、重量の低減を達成し、レトロディレクティブ機能を容易に追加し、さらに、スペーステナを薄型構造にすることが可能となる。これらの特長を利用して、筆者らはアンテナと送信機高周波部を有するレーダ送信機の構成を、板状の薄型構造で実現することを提案した[4]。すなわち、発振、増幅、変調、放射の各機能をそれぞれ板状基板で作製し、それぞれを積層させることで、薄型積層構造平面レーダを実現した。これは、機能追加に柔軟なハードウェアコンセプトを示したものである。さらに、太陽電池部との整合地上試験用に、さらなる高出力化にも積極的に取り組んでいった。

本報告ではアクティブ集積アンテナの小型・軽量といった特徴およびその種類について紹介し、アクティブ集積アンテナの特徴を生かした積層平面型レーダのコンセプトについて解説する。さらに、積層構造を用いたアクティブ集積アンテナの試作について述べ、太陽電池部分を含む150分の1モデルとの組み合わせ試験を行なった結果を示す。今後の展開として、アクティブ集積アンテナにフォトニックバンドギャップ構造や高出力多段増幅器を適用するための基礎実験についても述べる。

2. SPS 2000 用アクティブ集積アレイアンテナ

2.1. アクティブ集積アンテナ

アクティブ集積アンテナとは、集積回路と平面アンテナとを擬光学技術を用いて一体化させたもので、アンテナ

ナと回路を構成要素の段階から組み合わせ、混然一体化させることにより小型・軽量・多機能といった要求を満足させる技術である。このアンテナ技術の特徴として、能動素子を含む回路とアンテナとが混然一体化しているため、伝送損の軽減や小型化を容易に実現できる。また、能動素子がアンテナ各々に分散配置されているため、耐故障機能が向上し、さらに、空間で電力が合成されるため電力合成に対する回路設計の柔軟性の向上等が望める。

アクティブ集積アンテナを用いた送信機は、波動ビーム型とアレイ型の二つに大別される。図1に示すように波動ビーム型は固体能動素子を平面回路内に配置し、それをビーム形成のための空洞共振器に挿入することによって同期をとるものである。各素子間の同期が回路面に対し垂直になるため、回路面の発振器が高密度に配置でき、マイクロ波能動素子による大出力電力が可能となる。一方、図2に示したアレイ型は固体能動回路を基板面内で電氣的に同期配列させて同期を取る方式である。この場合、波動ビーム型のような高密度実装は望めないが、共振器が不要となり、各能動素子からの出力電力の合成はアレイアンテナの理論に従うという特徴がある。さらにアクティブ集積アンテナの特徴としてあげられるのが、空間電力合成である。この空間電力合成とは、個々の能動回路付きのアンテナから放射された高周波電力が、伝搬媒質を含む受信点までの全空間を電力合成のための領域と考える電力合成法である。この方法の最大の特徴は、受信電力を増すためには、個々の能動回路付きアンテナの数を増せばよく、半導体デバイス程度の出力をもつ能動回路を用いれば、等価的に受信電力が大電力を発生できる電子管の送信能力と同じにできる。したがって、SPS 2000のような電力送電に対しても、全固体素子化が可能となり、小型・軽量・多機能化が実現可能となる。

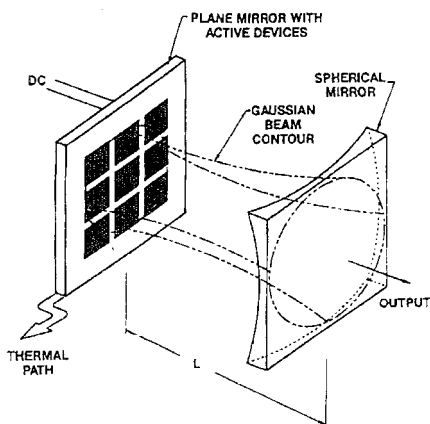


図1 波動ビーム型アクティブ集積アンテナ

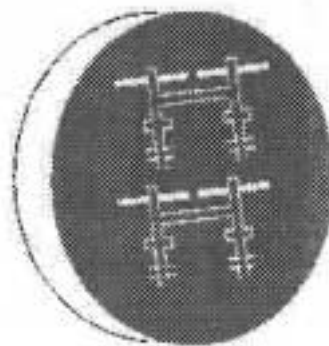


図2 平面アレイ型アクティブ集積アンテナ

2.2. 平面積層型レーダのコンセプト

スペースステナをアクティブ集積アンテナで構成する場合、アンテナや能動回路を同一平面上に配置すると、その面積は必然的に大きくなる。しかし、能動回路とアンテナとを電磁界的に結合する方式をアクティブ集積アンテナに取り入れると、発振、増幅、変調、放射の各機能をそれぞれ別の基板上に形成して、それらを重ね合わせて積層化することで、平面積層型レーダを構成することが可能となる。これらの概念を図3に示す。この場合、レーダに必要な機能は、各層で実現でき、いわゆる機能層と電磁結合層との組み合わせでレーダ機能を容易に拡張できる特徴をもつ。この構造を利用すれば、太陽発電衛星の追尾と電力放射に用いられるレトロディレクティブのような機能を容易に追加することができる。しかし、電磁結合を用いた積層構造では、各層間のアイソレーションや平行平板モード、表面波による漏れに対する対策が課題となる。

2.3. スペースステナ用アクティブ集積アレイアンテナ

太陽発電衛星SPS 2000を実現するための要素技術として、アクティブ集積アンテナ技術を用いることを提案したが、SPS 2000のスペースステナは、大規模アンテナシステムであるため、平面型のアンテナを膨大な素子数をも

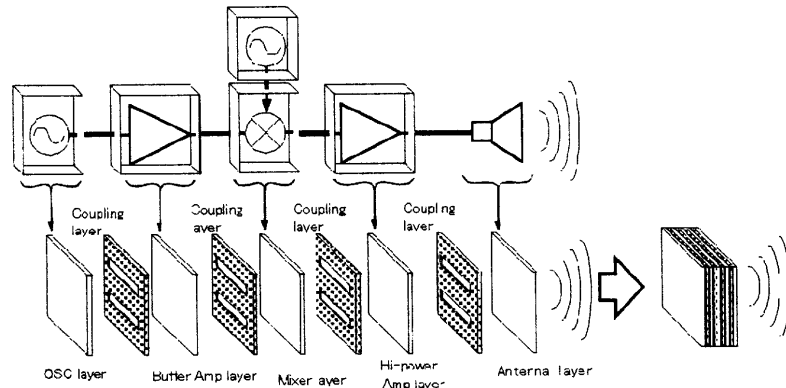


図3 平面型レーダのコンセプト

つアレイアンテナとして構築する必要がある。「SPS 2000 概念計画書」によれば、SPS 2000 の大型送電アンテナは折畳み式のパネルで展開されることが提案されている [1]。この基本概念に基づいて、われわれはアクティブ集積アンテナで構成した 2×2 アレイアンテナをひとつのパネル上に構成し、アレイアンテナのユニットとして用いて大規模アレイアンテナを実現する方法を提案した。

この 2×2 アレイで構成されたパネル、ユニットパッチプレートスペーステナにおいて展開するために、スペーステナアレイのアンテナモジュールフレームに金属のガイドレールを配置する方式を提案した。ガイドレールを用いたシステム展開概念図を図4に示す。この方式では、ユニットパッチプレートを容易に入れ込むことができる形状にすることにより、アクティブ集積アンテナユニットパッチプレートの強度の向上および容易な展開を実現できる。さらに、折畳み式のアレイモジュールが展開したときにユニットパッチプレートを電気的接続することが必要となる。レール方向には、ユニットパッチプレートに設けられたコネクタにより、また、ガイドレールの隣接方向には、ガイドレール側面に設けられた接続窓を介したコネクタ接続により、二次元方向に電気的接続を可能にする構成とする。

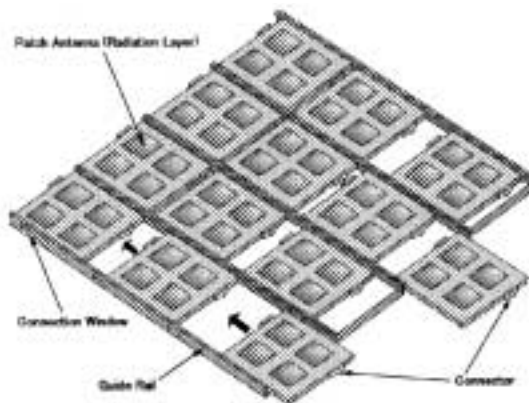


図4 システム展開概念図

3. 試作と実測

3.1. 設計方針

前項で紹介した平面積層型アクティブ集積アンテナ技術を用いて、SPS 2000 スペーステナに適用する送電用アクティブ集積アレイアンテナを試作した。アンプアンテナとした場合のユニットセルの構造を図5に示す。この

ユニットセルは、FET増幅器とパッチ共振器を含む最下層部の増幅層、2つのスロットを有する中間の結合層、マイクロストリップパッチアンテナより構成される最上面の放射層の3層構造を有している。はじめに、外部から増幅層に供給されたマイクロ波種信号はパッチ共振器の幅方向を通過してフィルタリングされる。その出力はFET増幅器でアンプされ、再び長さ方向中央より共振器に供給される。増幅された電力のみが結合層のスロットを通り、放射層に配置されたパッチアンテナを励振し、最終的に空間に放射される。中間の結合層のスロットは、増幅層からの電力を効率よくパッチアンテナと結合させるため、開口孔を2つとした。

ユニットセルは、2.45 GHzで設計した。増幅層の伝送線路は一部が積層構造のためストリップ線路構造であり、その他の部分はマイクロストリップ線路構造である。このため、増幅層は両者の混合になっているが特性インピーダンスは50Ω一定とした。増幅器の設計には回路シミュレータ(HP-EEsof: MDS)を用い、アンテナの設計には電磁界シミュレータ(HP-EEsof: Momentum)を用いた。

上記ユニットセルを元にし、2×2アレイで構成したユニットパッチプレートの増幅層の構造図を図6に示す。ユニットセルはH面及びE面に周期配列した構造としてある。H面配列に関して、パッチ共振器#1とパッチ共振器#2が同振幅で動作するように、方向性結合器は結合度を補う増幅率をもつアンプとペアで配置され、かつ、同位相で動作するようにアンテナ間のマイクロストリップ線路の電気長が決定された。同じくE面に関して、パッチ共振器#1の入力信号の一部を方向性結合器で取り出し、この結合度を補う増幅率を持つアンプがパッチ共振器#3の入力側に配置され、かつ、同位相で動作するようにマイクロストリップの電気長が決定された。このようにアンプと方向性結合器のペアを用いることにより、ユニットセルの入力と出力は常に一定に保たれ、H面方向および、E面方向に対して周期的に配列することが可能となる。作製上の都合により、今回は最適設計されていないが、アンテナの素子間隔はH面方向に0.65λ、E面方向に0.90λとした。

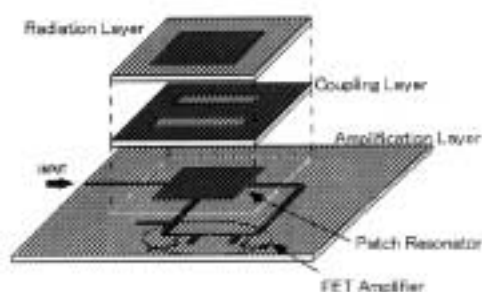


図5 ユニットセルの基本構造

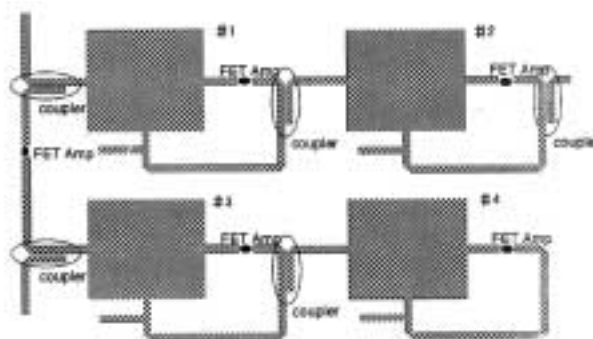


図6 ユニットセル二次元アレイ構成図

3.2. 測定

以上の設計概念をもとに、まず、アクティブ集積アンテナのユニットセルを試作した。試作品には比誘電率 $\epsilon_r = 3.25$ 、基板厚0.751 mm、圧延銅箔0.018 mmの誘電体基板(AERLON社:25NG0310CSSA)とFET増幅器にはパッケージタイプのMESFET(三菱電機:MGF1801B)を使用した。測定アンテナ-受信ホーンアンテナ(9.9 dBi)間の距離を1.7 mとした。2.45 GHzの外部信号を2.5 dBmで供給したときの最大受信電力は-20.83 dBmであった。この時の増幅器は $V_{gs} = -1.0$ V、 $V_{ds} = 2.5$ V、 $I_{ds} = 80$ mAで動作した。この時のアンテナパターン計測により、計算値と理論値はほぼ一致する傾向を示していることがわかり、設計方針が正しいことが証明された。

ユニットセルの試作・測定結果をもとにして、次にユニットセルを2×2に配置したパネル、ユニットパッチプレートを試作した。測定したアンテナパターンを図7(E面)、図8(H面)に示す。この時の最大受信電力は-9.30 dBmであった。測定値と計算値のピーク方向およびヌル点の位置はよく一致しており、各々のアンテナはおおよそ同振幅・同位相で動作していることが確認できる。また、図7のE面のエンドファイア方向の理論値と実測値の不一致は、有限基板によるエッジからの不要放射の影響と考えられる。

次に、図6に示す二次元配列の概念をもとに、ユニットパッチプレートを2×2に配列した(16素子)アクティブ集積アンブレイアンテナを試作した。このパッチプレート型アクティブ集積アンブレイアンテナを図9に示す。金属フレームに格納した2×2ユニットパッチプレートアレイの全体の大きさは、47cm×44cm、重量は1.35kgであった。測定されたアンテナパターンを図10に示す。素子間の振幅差および、有限基板による不要放射の影響よりサイドローブが増加しているが、ヌルポイントとメインローブにおいて実測値は計算値とほぼ一致する傾向を示している。これにより、ユニットパッチプレートを二次元配列の構造において展開し、各素子が同振幅・同位相で動作する原理を確認した。

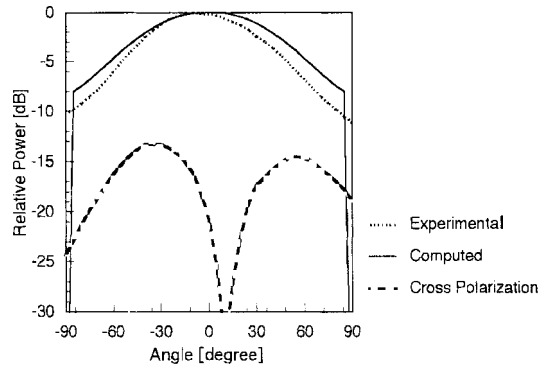


図7 ユニットパッチプレートアンテナパターン (E面)

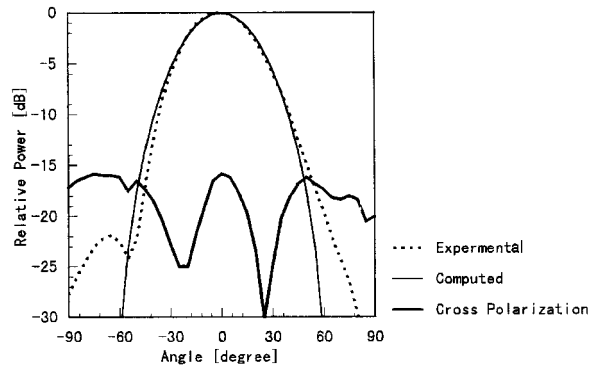


図8 ユニットパッチプレートアンテナパターン (H面)

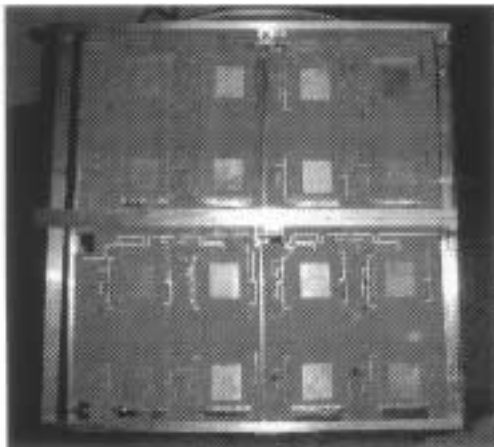


図9 二次元配列させたユニットパッチプレートアレイ

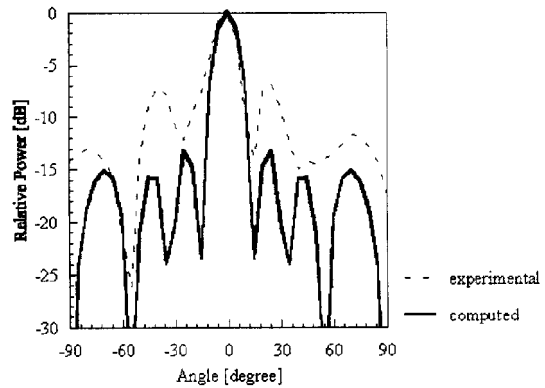


図10 2×2ユニットパッチプレートアレイアンテナパターン (H面)

3.3. 組み合わせ実験

太陽電池との整合性を確認するため、試作したユニットパッチプレートと、衛星システム構築・太陽電池に関するタスクチームの試作した太陽電池部を接続し、組み合わせ実験を宇宙科学研究所で行った。はじめに、無響暗室にてその放射パターンの測定（ただし、太陽電池との組み合わせはしていない）を行なった。図11に無響暗室で測定した放射パターンを示す。太陽電池との整合実験における測定は、ユニットパッチプレートと受信ホーンアンテナとの距離が0.75 m、外部入力RF信号を0 dBm、最大出力22.2 Wの太陽電池パネル（PSF 50H-361F：京セラ）2枚という条件のもとで太陽電池パネルからの出力をレギュレータをとおして行なった。ただし、太陽電池部は、ハロゲンランプ光を太陽電池に照射して動作させた。

この場合、ピーク受信電力は最大 - 13.5 Bm（EIRP：14.3 dBm）を示した。ユニットパッチプレートの重量が約220 gであるから、1g当たりのEIRPは0.122 mWである。これはスペーステナに要求される性能に比べかなり劣っている。この問題への対策は次項で述べる。また、図11の無響暗室での放射パターンについては、サイドローブがかなり大きくなっていることが確認できる。これは、基板エッジからの不要放射及び各ユニットセルからの放射電力強度のアンバランスが原因と考えられる。

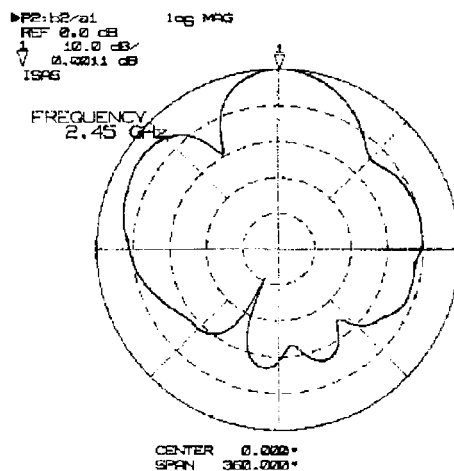


図11 無響暗室で測定したユニットパッチプレートの放射パターン（E面）

3.4. 改善策

各種積層型アクティブ集積アンテナの試作・測定結果において、サイドローブの増加、直交偏波の増加、アンテナパターンの乱れが観測された。これらの原因として有限基板のからの不要放射、素子間の振幅差、位相差等が考えられるが、不要放射の対策としては、積層基板内の共振の回避がある。このため有限基板の大きさは半波長の整数倍を避けるといった工夫がなされた。また、表面波や平行平板モードの抑圧のためフォトニックバンドギャップ（Photonic Band-Gap: PBG）の回路・アンテナ基板への適用が考えられる。誘電体基板を肉抜きしたPBGの構造を図12に示す。PBGとは、ある特定範囲の周波数の電磁波があらゆる方向に対して伝播が禁止される状態である。これを利用すれば、伝送損失の極めて少ない線路や高放射効率の平面アンテナなどが実現できる。図13に銅はく部分をエッチングによって取り除く方法によるPBG構造を用いて試作した伝送線路の例を示す[5]。解析プログラムに基づいて設計されたPBG構造は、誘電体回路基板の銅はく部分をエッチングで取り除く方法によって実現された。また、各素子間の振幅差の改善法としては能動素子のバイアス条件が影響していることから、電圧調整用のトリマを加えることで振幅のバラツキを補正した。位相差補正の対策としては、増幅層の伝送線路にチューニング用のダブルスタブを挿入し、アンテナビームパターンを改善することができた。

高出力及び高利得増幅器を実現するための方法として、FET増幅器を多段に接続することが挙げられる[6]。多段搭載したFET増幅器の設計方針として、入出力の帯域を広帯域にする必要がある。これはバイアス条件の変

動により入出力の特性が変化するので、お互いの増幅器が整合のバランスを崩し発振を起こす可能性がある。したがって、これらバイアスの変動による整合条件の変化を許容する帯域が必要となる。FET増幅器の広帯域化の方法としては負帰還型、抵抗整合型、分布整合型等がある。ここでは、製作の省スペース化、整合性の良さから抵抗整合型で設計を行った。抵抗整合型増幅器はFETのゲート・ソース間および、ドレイン・ソース間に抵抗を装荷し、増幅器の反射特性の改善、利得の平坦化を図る増幅器である。さらに、増幅器を二段搭載すると帯域外での利得が高くなり、不安定になる可能性があるため、特に低周波での発振を抑える構造とした。試作品には初段のFETとして低雑音FET（三菱電機：MGF4314E）、終段のFETとして高出力FET（富士通：FLL107ME）を用いた。



図12 二次元PBG構造図（穴状）

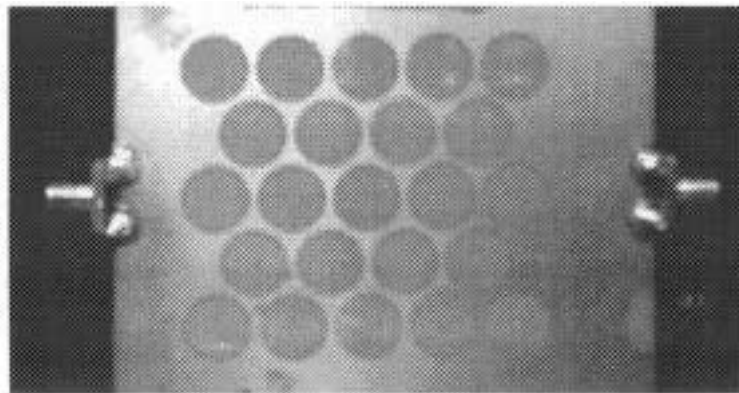


図13 PBG構造を用いた基板

4. 今後の研究

今回の試作で、積層型アクティブ集積アンテナの基本コンセプトに基づいたデータが得られた。今後、研究の展開としては、送電用アンテナのさらなる軽量・多機能化、高出力化、アンテナの大口径化、システム展開等を実現させてゆく予定である。それらの具体例を以下に示す。

軽量化については、回路・アンテナ基板の材料や加工法の再検討があげられる。グラファイト系のような超軽量基板の使用や、アンテナ基板に三次元PBG構造（図14）を用いる方法もある。また、多機能化に関しては、パイロット信号の到来方向にビームを送り返すレトロディレクティブを用いて、ビームの空間安定化や追尾を行うことや、送電用アンテナと電源でもある太陽電池パネルとを一体化させ、小型モジュール化することなどが挙げられる。これらの要求にも、今回提案した積層型アクティブ集積アレイアンテナを用いれば、容易に機能の追加が可能である。また、パイロット信号にレーザー信号を用いることも考えられる。

電力送電においてアンテナ一素子当たり的高出力化が要求されているが、アクティブ集積アンテナにおいては高出力化のために高出力FETの搭載や高効率なF級増幅器を用いることが有効である。また、アクティブ集

積アンテナ技術の利点を活かせば、電子管タイプ（例えばマグネトロン）の送信機との融合も可能なため、これらの電子管とアクティブ集積アンテナ技術の組み合わせによる高出力化が期待できる。動作周波数においては5.8 GHz帯を用いることで、更なるアンテナの小型化が期待できる。

さらに、大口径アンテナへ発展させるためにユニットパッチプレートを自動組立が容易な折たたみ式の構造とし、電気的特性・機械的強度を満足することを考えている。今後、これらの展開を視野にいたした小型SPSモデルとアクティブ集積アンテナの整合実験を進める予定である。また、このスペーステナにレーダ・通信といった機能をもたせられないかといった検討も進めていきたい。

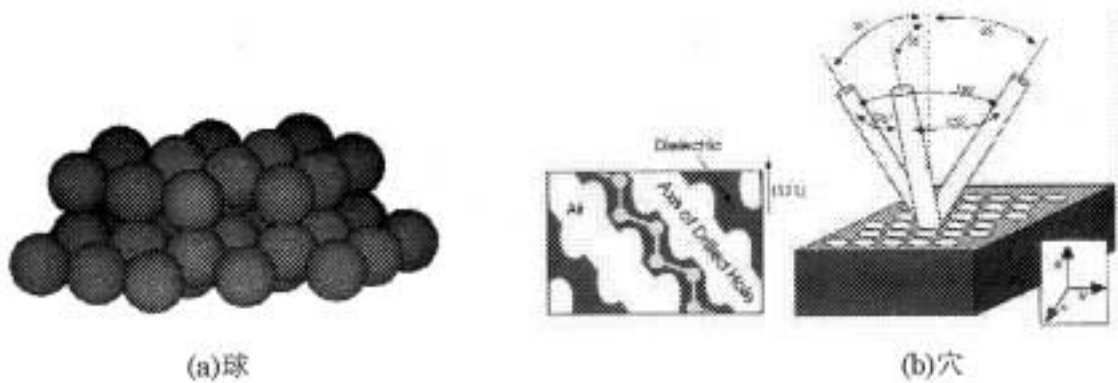


図14 三次元PBG構造

5. まとめ

SPS 2000 スペーステナ用アクティブ集積アンテナアレイの基本コンセプト、ユニットパッチプレートとそのアレイ等の試作および知見について述べ、今後の展開について検討した。積層型アクティブ集積アンテナにおいて1素子当たり1W出力で50gを実現した（50gpw）。また、高出力化のために二段増幅器を搭載し、ユニットセルにおいて数Wを出力できる構成を示した。今後、システム展開に向けて太陽電池との整合性、高効率化、多機能化を検討していく予定である。

参 考 文 献

- [1] 太陽発電衛星ワーキンググループSPS2000タスクチーム：「SPS2000概念計画書 暫定版」 宇宙科学研究所，1993年7月
- [2] 大宮，堀口，伊藤：“SPS2000スペーステナ用キャビティ付きスロットアンテナに関する実験的考察”，1994年電子情報通信学会春季大会，B-62（1994-03）。
- [3] S.Kawasaki, Y.Kido, T.Takano：“Laminated Active Integrated Amplifier Antenna Arrays for a Space Solar Power Satellite,” IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol.47, pp1901-1909, Sep. 1999.
- [4] 早川宏之，木戸善晴，吉田雄輝，川崎繁男，高野 忠，佐々木進，長友信人，成尾芳博：“積層型アクティブ集積アンテナアレイの設計法”，第2回SPSシンポジウム，Nov.1999.
- [5] Naoki Okubo, Hiroyuki Hayakawa, Kazuhisa Iwasaki, Kenta Suzuki, Shigeo Kawasaki：“Characteristics of Laminated Antenna with a Photonic Band Gap Structure”，KJMW2000, Seoul, Korea, Sep.2000
- [6] 木戸善晴，早川宏之，吉田雄輝，川崎繁男，長友信人，佐々木進：“高出力型アクティブ集積アンテナアレイ”，2000年電子情報通信学会総合大会，Mar. 2000