

SSPS 用アクティブ集積アンテナの小型増幅器の諸特性

七日市 一嘉[†] 川崎 繁男[†] 篠原 真毅[†] 松本 紘[†]

吉田 裕之[‡] 香河 英史[‡] 久田 安正[‡] 森 雅裕[‡]

† 京都大学生存圏研究所 〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄

‡ 宇宙航空研究開発機構 〒305-8505 茨城県つくば市千現 2-1-1

E-mail: † {nanoka, kawasaki, shino, matsumot}@rish.kyoto-u.ac.jp

あらまし 我々の研究グループでは、宇宙太陽発電システム(SSPS)に適用できるアクティブ集積アンテナ原型モデルの試作研究を進めている。本報告では、SSPS 用小型・高出力アクティブ集積アンテナを実現する上で重要な小型増幅器の設計・試作結果、および増幅器とパッチアンテナとを結合させたアクティブ集積アンテナの試作結果について示す。増幅器の特性に関して、当初はシミュレーション結果と試作結果には乖離が見られたが、ボンディングワイヤの影響を考慮しつつシミュレーションと実測を対比させて調整を行った結果、シミュレーション値と実測値を近づけることができた。

キーワード SSPS, アクティブ集積アンテナ, 増幅器, パッチアンテナ

Characteristics of a Compact Amplifier for an Active Integrated Antenna for SSPS

Kazuyoshi NANOKAICHI[†] Shigeo KAWASAKI[†] Naoki SHINOHARA[†]

Hiroshi MATSUMOTO[†] Hiroyuki YOSHIDA[‡] Hideshi KAGAWA[‡] Yasumasa HISADA[‡]

and Masahiro MORI[‡]

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

‡ Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) 2-1-1 Sengen, Tsukuba, Ibaraki, 305-8505 Japan

E-mail: † {nanoka, kawasaki, shino, matsumot}@rish.kyoto-u.ac.jp

Abstract The Active Integrated Antenna for wireless power transmission has been being studied as one of the promising candidates for realization of Space Solar Power System (SSPS). In this report, design and fabrication of a compact amplifier and an active integrated amplifier antenna for SSPS are demonstrated. As for the characteristic of the amplifier, though there're some differences between the simulated results and the measured results initially, good agreement between the simulation and the measurement is obtained under suitable adjustment to reactance of the bonding wires.

Keyword SSPS, Active Integrated Antenna, Amplifier, Patch Antenna

1. はじめに

宇宙太陽発電システム(Space Solar Power System : SSPS)は、宇宙空間で太陽光エネルギーをマイクロ波に変換し地上に無線電力伝送するシステムである。SSPSは24時間発電が可能でCO₂などの温室効果ガスを排出しないクリーンな次世代基幹電力源として期待されている。SSPSを実現するためにはマイクロ波送電技術の確立がキーポイントであり、高性能かつ高効率・小型軽量のマイクロ波送電システムの開発が必須である。アクティブ集積アンテナ技術を用いたマイクロ波送電システムはこれらの要求事項に応え得る有力な候補とされる[1][2][3]。アクティブ集積アンテナ(Active Integrated Antenna : AIA)は、発振器や増幅器などの能動素子を含む回路と平面アンテナとを一体化

したシステムである。送信器とアンテナとを別々に作成する従来のシステムと比較して伝搬損が軽減でき小型軽量化が図れ、発振、増幅、放射などの機能を別々の基板上に実現し、それぞれの基板を電磁的に結合することで容易に多機能なアンテナを実現できる。

本研究では、アクティブ集積アンテナ技術を用いた増幅器、移相器などの能動回路と平面アンテナを一体とした薄型構造のマイクロ波送電用フェイズドアレイ(ユニットパネル)を実現することを目標としている。このために、増幅器をはじめとする能動回路はグレーディングロープの発生を抑えるため約0.7波長四方(3.5cm 四方)内に収めなければならない。この制限を考慮してAIA薄型平面フェイズドアレイを構築するために、約0.7波長四方内に収まる小型増幅器(ド

ライバ) の設計・試作検討, およびドライバ増幅器 + 方形パッチアンテナのアクティブ集積アンプアンテナの試作を行ったので報告する。

2. 設計

2.1. 回路構成

AIA 一素子当たりの出力が 1W 程度の SSPS 用小型・高出力 AIA アレイの実現を目標としており, ドライバ段増幅器と高出力増幅器(HPA)の二段増幅器構成とする(図 1)。この二段増幅器を約 3.5cm 四方の枠内に構成できるかが設計のポイントとなる。

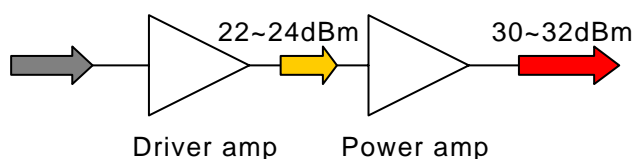


図 1 増幅部回路構成

2.2. 小型ドライバ段増幅器

HPA を駆動するために十分な電力を供給するドライバ段の増幅器の設計を行った。増幅器の設計には Agilent technology 社製高周波回路シミュレータ ADS を使用した。

今回の増幅器の設計は, 報告[4]における設計方針・試作結果を念頭に入れて再設計を行ったものである。増幅素子には, ゲート幅 3mm の S 帯-Ku 帯用中出力 MESFET(三菱電機製)を使用した。誘電体基板には, 整合回路とバイアス回路の面積を減らすために高誘電率の基板を用いた。用いた基板は中興化成工業製の積層基板 CGC-500 (比誘電率 $\epsilon_r = 10.0$, 基板厚み $h = 0.8\text{mm}$, 銅箔厚み $t = 0.018\text{mm}$, 誘電正接 $\tan \delta = 0.0035$) である。整合回路の寸法および帯域の両面を考慮して整合回路の最適化を図った。また, MESFET とマイクロストリップ基板を結ぶボンディングワイヤのインダクタンスとして, ワイヤの長さを考慮しドレイン側, ゲート側ともに 0.5nH と仮定した。

図 2 に, 設計したドライバ段増幅器のレイアウトを示す。また, ドライバ段増幅器の反射特性および通過特性を図 3, 図 4 にそれぞれ示す。安定係数(K-factor)は 1~10GHz において 1 以上を満足することを確認した。

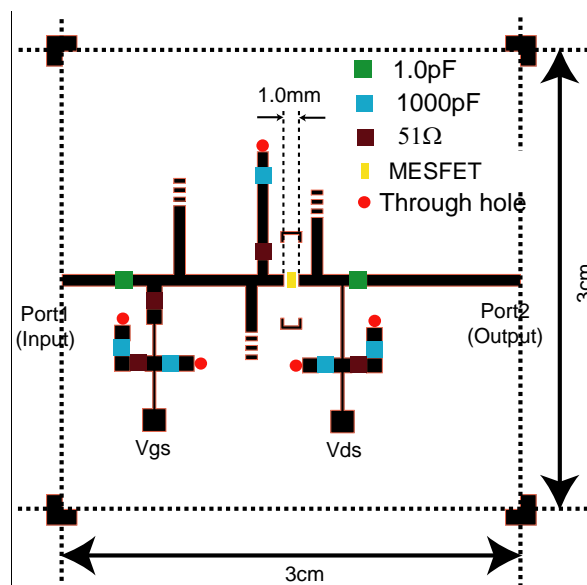


図 2 ドライバ段増幅器のレイアウト

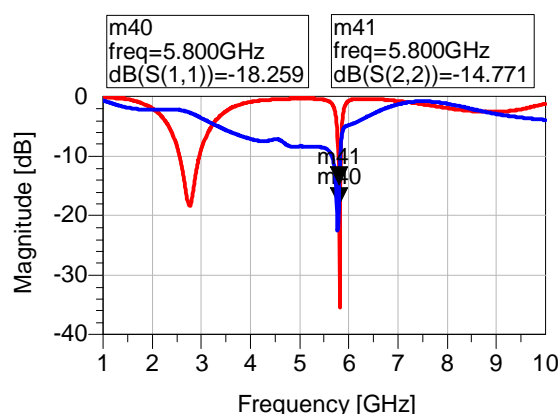


図 3 ドライバ段増幅器の反射特性(設計値)
(赤: S11, 青: S22)

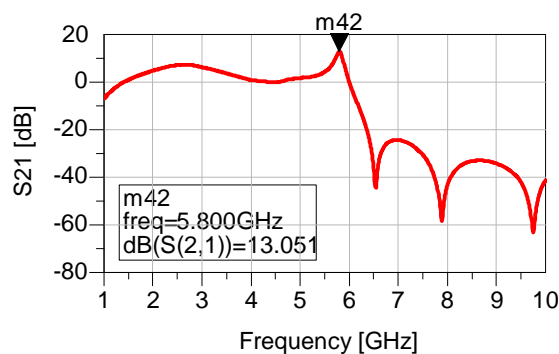


図 4 ドライバ段増幅器の通過特性(設計値)

2.3. 方形パッチアンテナ

アクティブ集積アンテナは，増幅器層の裏面に方形パッチアンテナ（直線偏波）を有する構造とする．方形パッチアンテナの設計には，Agilent 社の平面電磁界シミュレータ Momentum を使用した．パッチアンテナの誘電体基板には日本ピラー（株）製テフロンガラス基板 NPC-F260A（比誘電率 2.6，厚さ 1.6mm，誘電正接 0.0015）を用いた．図 5，図 6 に設計したパッチアンテナのレイアウトおよびリターンロスを示す．5.8GHz においてリターンロスが最適となるように寸法が選ばれた．また図 7 に放射パターン（E 面，H 面）を示す．

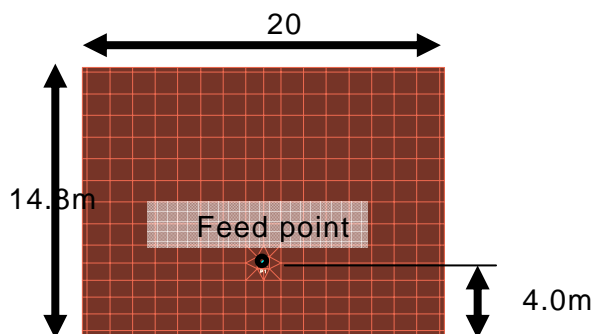


図 5 方形パッチアンテナのレイアウト

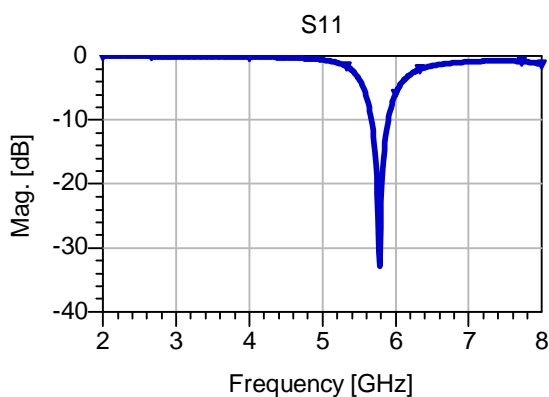


図 6 方形パッチのリターンロス（設計値）

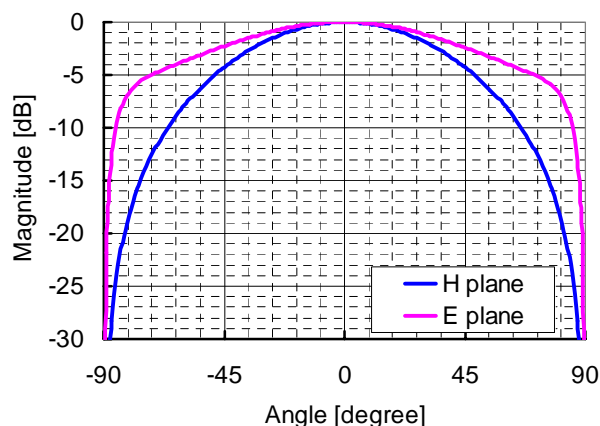


図 7 方形パッチの放射パターン（設計値）

3. 試作・測定結果

3.1. 小型ドライバ増幅器

設計結果に基づいて試作を行った結果を示す．チップの MESFET は，サブキャリア（アルミ板）の上に導電性接着剤を用いて固定し，金ワイヤを用いて MESFET と入出力マイクロストリップ回路間のワイヤボンディング（ゲート，ドレイン計 8 本）を行った．図 8 に小型ドライバ増幅器の試作品を示す．

図 9 に利得の周波数特性の実測結果と設計結果の比較を示す．測定時のバイアス条件はドレイン電流 $I_d=300\text{mA}$ ，ドレイン電圧 $V_d=3.0\text{V}$ である．実測においては，スタブ調整を行うことにより 5.8GHz で約 5dB の利得を得た．この調整に関しては，4.節の検討において詳細に議論する．

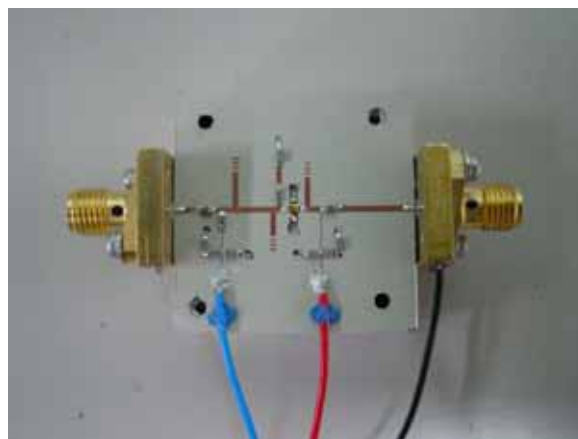


図 8 小型ドライバ増幅器の試作品

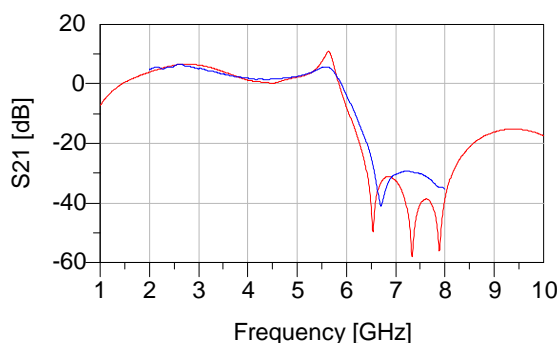


図 9 S21 の測定結果（青）と設計結果（赤）の比較（調整後）

3.2. アクティブ集積アンプアンテナ

表面に増幅器回路基板，裏面にアンテナ基板を有するアクティブ集積アンプアンテナの試作を行った．図 10 に AIA の回路面，図 11 に AIA のアンテナ面の外観写真を示す．SMA コネクタ部を除く平面寸法は，32mm × 32mm である．

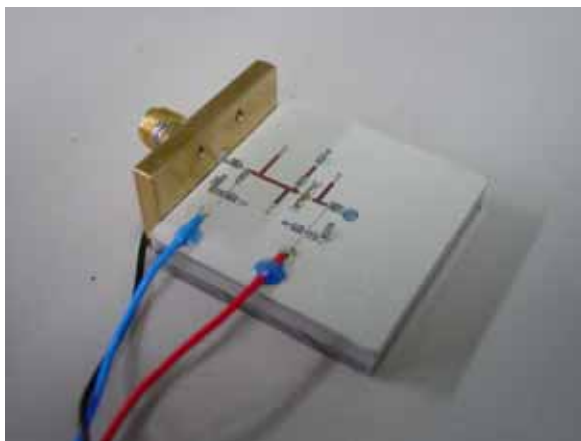


図 10 アクティブ集積アンプアンテナ（回路面）

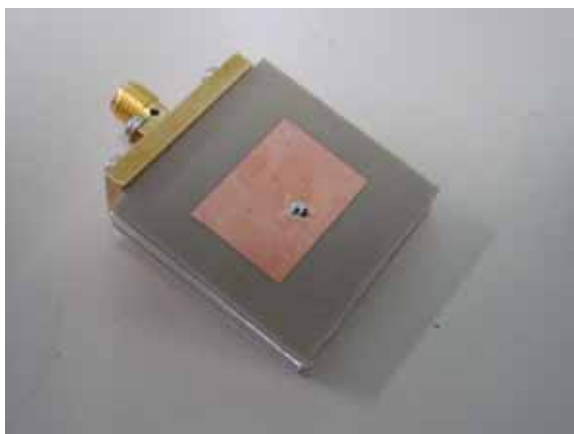


図 11 アクティブ集積アンプアンテナ（アンテナ面）

4. 検討

今回ドライバ増幅器の試作を行った結果，無調整の状態では 5.8GHz において十分な利得を得ることができなかった．そこで，スタブ長を調整することによって利得を改善することを試みた．調整が可能なスタブは，ゲート側のスタブ G1（MESFET に近い側），G2（MESFET から遠い方），およびドレイン側のスタブ D1 である．

まず設計時に仮定したボンディングワイヤの等価インダクタンスに見積もり誤差が生じていることが一つの要因と考え，ADS を用いた回路シミュレーションより，実測値とシミュレーション値を比較しながら両者の特性が近づくようなインダクタンス値を見出した．その結果，完全な一致では無いものの，ゲート側ワイヤ，ドレイン側ワイヤのインダクタンス値を適切に処理することにより，実測値とシミュレーション値が比較的近づくことが明らかとなった．

次に，上記調整を仮定した状態で，ゲート側およびドレイン側のスタブ長を調整し，利得及び入出力特性がどのように改善させるかをシミュレーションにより確認した．その結果，スタブ G1 を 1.0mm 延長することにより，5.64GHz において約 10dB の利得が得られることが分かった．一方，この結果を踏まえて実機において調整を行った結果，スタブ G1 を約 0.5mm 延長したときに，5.62GHz において 5.6dB の利得が得られることを確認した．図 12, 13, 14 に，ワイヤインダクタンスを上記設定値とした上で調整したシミュレーション値（赤）と実測による調整結果（青）の S11, S22, S21 をそれぞれ示した．利得(S21)の大きさ，および S22 の特性についてはまだ差異が見られるが，シミュレーションと実測が同一の傾向を示しており，ワイヤのインダクタンスを正確に把握することで設計の精度を向上させることができると考えられる．また，利得が約 5dB@5.8GHz と低い点については現在原因を検討中であるが，ゲート側直近に設けた安定化用チップ抵抗の特性が一つの要因ではないかと考えている．

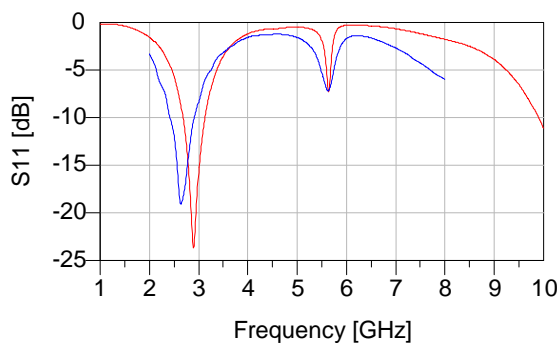


図 12 ワイヤインダクタンスを考慮し直して調整したシミュレーション（赤）と実測調整（青）の比較(S11)

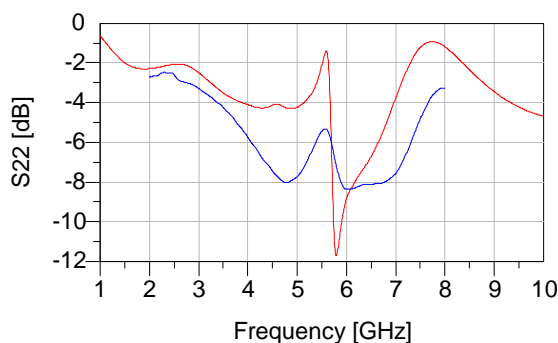


図 13 ワイヤインダクタンスを考慮し直して調整したシミュレーション（赤）と実測調整（青）の比較(S22)

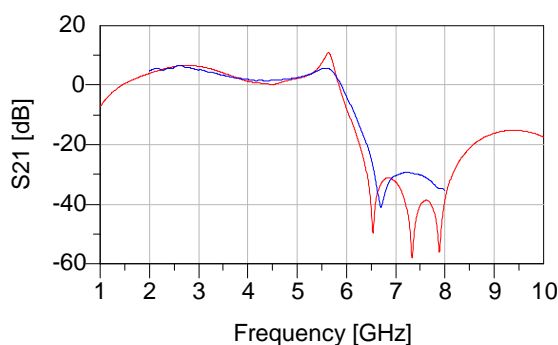


図 14 ワイヤインダクタンスを考慮し直して調整したシミュレーション（赤）と実測調整（青）の比較(S21)

5. 結論

本報告では、SSPS マイクロ波送電システムに適用するための小型・高出力 AIA アレイ実現に必要な小型増幅器の設計・試作結果およびその特性に関する検

討結果について示した。今後の増幅器の設計においてはボンディングワイヤのリアクタンス成分の正確な予測を行うことにより、所望の特性を満たす AIA アレイの設計が行えると考えられる。

謝辞

本研究を進めるに当たり、MESFET チップを提供頂きました三菱電機（株）の関係各位並びに三菱電機特機システム（株）の飯田 明夫 氏をはじめとする関係各位に感謝申し上げます。また、本研究の一部は、21 世紀 COE プログラム「環境調和型エネルギーの研究教育拠点形成」により支援された。

文 献

- [1] 篠原 真毅, “宇宙太陽発電所 SPS とマイクロ波送電技術-超巨大宇宙システムへのアクティブ集積アンテナの応用,” MWE2003 Microwave Workshop Digest, pp.357-362, Dec. 2003.
- [2] 大石 太洋, 川崎 繁男, 篠原 真毅, 松本 紘, “スロット-パッチアンテナによる空間電力増幅器,” 信学技報, MW2002, 21-26, 2002.
- [3] 川崎 繁男, 七日市一嘉, 山田修平, 仁木洋平, 飯田雄介, 奥村碧, 篠原真毅, 松本紘, “レトロディレクティブ機能を持つ SSPS 用小型アクティブ集積アンテナアレイの開発,” 信学技報, SPS2004-13, Feb. 2005.
- [4] 七日市 一嘉, 川崎 繁男, 篠原 真毅, 松本 紘, “SSPS のためのアクティブ集積アンテナ用小型増幅器の検討,” 信学技報, SPS2004-12, Feb. 2005.