

# Examination of a beam control system for SSPS

Yohei Niki<sup>†</sup> Yusuke Iida<sup>†</sup> Shigeo Kawasaki<sup>‡ †</sup>  
Koji Tanaka<sup>‡</sup> Susumu Sasaki<sup>‡</sup>  
Ryuichiro Oyama<sup>†</sup>

<sup>†</sup>Department of Electrical and Electronic Engineering, School of Electronic Information, Tokai University  
1117 Kita-Kaname, Hiratsuka, Kanagawa 259-1292 Japan

<sup>‡</sup>Institute of Space and Astronautical Science/Japan Aerospace Exploration Agency  
3-1-1Yoshinodai, Sagami-hara, Kanagawa 229-8510, Japan

<sup>‡ †</sup>Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University  
Gokasho, Uji, Kyoto, 611-0011 Japan

E-mail: [†kawasaki@ieee.org](mailto:kawasaki@ieee.org)

## Abstract

In recent years, global warming and environmental pollution raise a problem along with the increase in the carbon dioxide radiation by use of a fossil fuel. An SSPS (Space Solar Power Satellite) plan has been proposed as one of the solutions of these problems. Namely, a huge solar cell is carried on a geostationary orbit, electric power obtains from the sun, it changes and transmits to microwave, and there is a plan to use it again as electric power on the earth. Clean energy can be supplied without any weather conditions in a whole night and day. Lightweight, small, and beam control are demanded for SSPS realization. It is most important to generate the exact a microwave beam to the pilot signal transmitted from the receiving antenna side on the earth. In this research, Active Integrated Antenna (AIA) with a mixing system retrodirective function in a SSPS power transmission part, was demonstrated. It becomes the promising solution of the microwave beam control by uniting AIA with retrodirective technology.

In this paper, examination of AIA with a mixing system retrodirective in SSPS is reported. The design and fabrication of a loop oscillator by mixing for the retrodirective function were performed. The output at 5.80 [GHz] was obtained with well-worked antenna patterns by mixing with the local oscillation frequency of 8.70 [GHz] and the pilot signal of 2.90 [GHz]. Since research was done from the soft side and the hard side, this laboratory reports a retrodirective with a beam control function.

**Keyword** SSPS, Active Integrated Antenna, Phase Conjugation, Mixing, Wide-band Amplifiers, Loop Oscillator Retrodirective

# SSPS 用ビーム制御方式の検討

東海大学 電気電子システム工学専攻 仁木 洋平

## 1.背景

現在、我々の住む地球では発電用資源として、様々なエネルギー資源を利用している。その為、化石燃料の利用による二酸化炭素排出量の増加による地球温暖化と言った環境問題や、化石燃料埋蔵量の枯渇化などが問題視されている。それらの解決策のひとつとして、クリーンで半永久的なエネルギーを供給し続けることの出来る SSPS (宇宙太陽発電衛星) 計画があげられる。世界的に省エネに努め、それと同時新たなエネルギー源を考える必要性があり、この宇宙太陽発電衛星は将来の新エネルギー源のなかでも有望な一つの、選択肢であると考えられる。SSPS 計画は巨大なソーラーパネルを搭載した太陽発電衛星を静止軌道上に打ち上げ、そこで得られた電力をマイクロ波に変換し、地上に送電し再び電力に変換し利用する計画である。SSPS 計画実現の為に送電用アンテナ部において、軽量・小型・ビーム制御などが要求されている。この中で地上のレクテナ (受信アンテナ) 側から送信されてくるパイロット信号を受信し、その方向に対して正確なマイクロ波ビームを向けるレトロディレクティブ機能が、重要な技術の一つであると考えられる。本研究室では、ビーム制御機能を持つレトロディレクティブの動作確認を行ったので報告する。

## 2.レトロディレクティブ機能

### 2.1 レトロディレクティブの原理

Figure.1 に示すように、ある角度から受信アンテナに対して信号が入射されると、波源からの距離が同一でないため、隣接するアンテナ間に  $+\theta_1$  という位相差が生じる。この生じた位相差  $+\theta_1$  を位相反転器によって逆位相とし、元の波源方向に対して信号を送り返すことが可能となる。ソフトウェアレトロディレクティブ機構ではアンテナ間で生まれた位相差を、位相検出器を用いて検出を行い電圧変換し、プログラムされたマイコン制御を行い、アンテナに付属する移送器に ON/OFF を与える事で、元の波源方向に信号を返すことが可能となる。

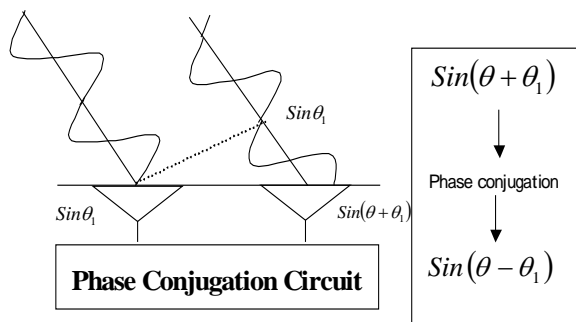


Fig.1 位相反転の原理

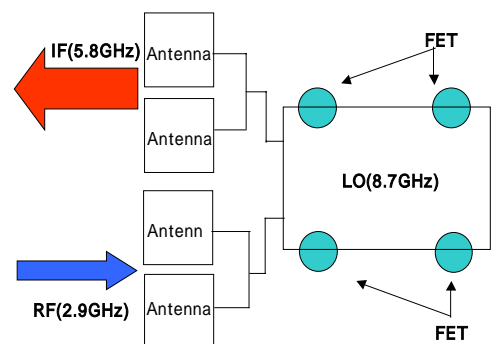


Fig.2 ミキシング動作

Figure.2 にはハードウェア制御を行うレトロディレクティブ機能の概要を示す。到来した無線周波数 (RF : Radio Frequency) である 2.9 [GHz] と局部発振周波数 (LO : Local Oscillator) 8.7 [GHz] の出力を半導体素子 (FET) の有する非線形性を利用し、ミキシングした中間周波数 (IF : Intermediate Frequency) 5.8 [GHz] を発生させるものである。この技術を用いることによりアンテナ面での到来波と応答波との電波の混在を防ぐ事が可能になる。更に、LO 周波数 8.7 [GHz] を RF 周波数 2.9 [GHz] より高くすることにより、負の位相を生じさせ位相共役を生じさせることが可能となる。ソフトウェア制御とでは、位相の取りこみ方が極端に異なる。位相情報は位相検出器を用いて電圧変換さ

せマイコンで制御するが、ハードウェアはアンテナに直接入力を行い、位相情報を発振器によるミキシングによって反転を行う。そのため小型・軽量と言った利点が挙げられる。

### 3.回路設計

#### 3.1 SSPS デモモデルの制御回路設計

今回、設計・試作したソフトウェアレトロディレクティブ機能のブロック図とデモモデルの概要を Figure.3 に示す。まず、SSPS の送電部側のデモモデルを考えると、三角形の 2 面が太陽電池パネルに覆われ、もう 1 面に送信アンテナを取り付け、ソフトウェアレトロの制御回路部は、アンテナの背面に取り付ける。また、レトロ機能を満足させるために送電部の直下には受信部を設け、そこからのパイロット信号を送電部に向ける。Figure.3 の下図には SSPS 受電部を示す。SSPS デモモデルのレトロ機能の動作は、受信部に搭載された 1[GHz]のアンテナよりパイロット信号である質問波が送信され、送電部に搭載された 1[GHz]のアンテナで受信する。受信部のアンテナが、送電部の真下 0 度のとき位相差は生じず、2.45[GHz]の信号は直下 0 度のレクテナに送電される。また、受信部側の 1[GHz]のアンテナが Y 軸方向に移動すると、送電部に搭載されたアンテナに位相差が生じる。生じた位相差は位相検出器 AD8302 に入力される。検出器によって電圧変換された位相信号は PIC マイコンに送られ、各々のアンテナに従属された移送器の ON・OFF 動作によりレトロディレクティブ機能を満足するように働く。



Fig.3 SSPS デモモデルブロック図

また、位相検出器である AD8302 は Analog Devices 社製の位相検出器を用いた。送られてくるパイロット信号を入力信号にすることにより、10mV/度で 0~180 度のレンジにわたるスケールで、位相測定を行った。計算より 1.2V=120 度の時に、H 面でのビーム方向が 24 度となることから 1[GHz]のアンテナ間隔を 10.1cm に設置した。1bit 移相器への ON/OFF は PIC マイコンを用いて制御を行った。PIC マイコンは入力された電圧信号に応じてスイッチ動作が可能となるように、プログラミングによって操作を行った。移相器は PIN ダイオード 2 つを用いて設計を行い、PIN ダイオードには日立の 1SY123 を用いた。移相器は、電力分配器を用いて伝送線路長を PIN ダイオードの ON/OFF 動作によって位相が変化する仕様を取った。1 ビットを 4 構成とし設計を行った。それぞれ 1 ビットの ON 状態では正面方向(0 度)に放射するため同相である。OFF 状態では、H 面でのヌル点である 24 度方向にビームシフトする。また、各移相器の位相差を 95 度スペックで、線路長を 0 度, 95 度, 190 度, 285 度となるように設計した。また、送電・受電に搭載された 1[GHz]アンテナには、マイクロストリップ線路のパッチアンテナを用いた。使用基板はアンテナ・移相器共に ARLON 社の 25G0300SS34(誘電率: 3.38, 厚さ: 0.762[mm], tan δ: 0.0025, 銅厚: 0.018[mm])を用いて設計を行った。

### 3.2 ハードウェアレトロディレクティブの回路設計

ハードウェアレトロディレクティブのブロック図と実験モデルの概要を Figure.4 に示す。レトロディレクティブ機能を満足するためループ発振器内部に、位相情報を持つ信号の入力を行う。動作確認として Signal Generetar より 2.9[GHz]の信号の入力を行い、質問波である 2.9[GHz]がある角度から入射されたと仮定し、位相調整器である Phase Shifter を使用して位相情報を与え、ループ発振器 AIA 内部に入力を行う。入力された信号は半導体素子 (FET) の有する非線形性を利用し、差信号である 5.8[GHz]の出力をアンテナより放射する。入力された信号が位相情報を反転させ、元の波源方向と仮定した方向に返すことが出来ればハードレトロディレクティブ機能を満足することができる。

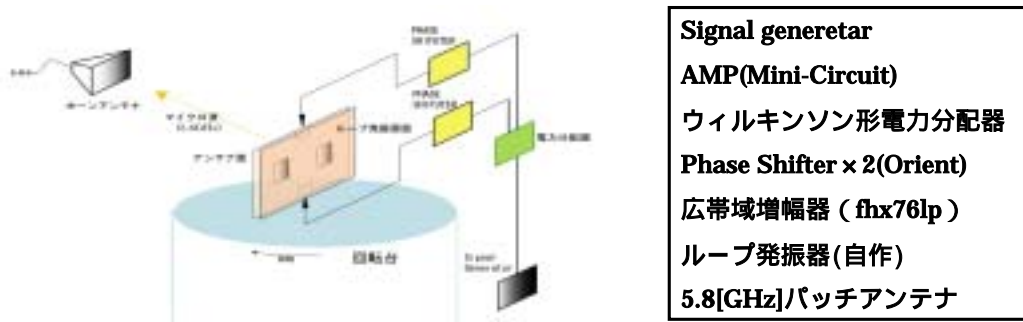


Fig.4 ハードウェアレトロディレクティブのブロック図

#### 3.2.1 ループ発振器 AIA の回路設計

ループ発振器 AIA の設計レイアウトを Figure.5 に示す。AIA 回路の制御面はミキサで構成されている。ループ発振器は広帯域増幅器のドレイン出力の一部を入力に正帰還させ、発振させるループ発振器となっており、方向性結合器を介して、2つの広帯域増幅器より構成されている。また、ハイパスフィルタをループ内に4つ設けることにより、発振の安定化・低周波成分の通過抑制などを配慮し設計・試作を行った。設計には市販の回路シミュレータ (Agilent 社 Advanced Design System)を用いて設計を行った。広帯域増幅器の設計は、ループ発振器とした際に 2.9[GHz]、5.8[GHz]、8.7[GHz]で各々の周波数が増幅する回路構成とした。また、広帯域に利得が得られるように FET(flx76lp: 富士通カクタムデバイス社製: 低雑音 HEMT) を直列に2段接続し、縦列接続した分布形増幅器 CSSDA (Cascaded Single Stage Distributed Amplifier) 構造とした。増幅器の設計は 2~9[GHz]を目安とし、FET 二段で利得 20[dB]を目標に設計を行った。基板はテフロン系の基板 (日本ピラー工業株式会社製 F 260 A: 比誘電率=2.6 基板厚=0.8[mm] 導体厚=18[μm] 誘電体損 0.0024) を用いた。また発振器の設計において PORT1 の位置に、OSC テストコンポーネントを配置し所望の発振周波数である 8.7[GHz]でループ利得が 1 以上、位相が 0 度になるように設計を行った。シミュレーション結果を Figure.6 に示す。またレイアウトにおいて PORT2・4 が 2.9[GHz]の入力、PORT3・5 が 5.8[GHz]の出力構成をとっている。シミュレーション結果より 8.7[GHz]でのループ利得=4、位相 0 度という結果が得られた。これより発振器として動作している事が確認出来た。

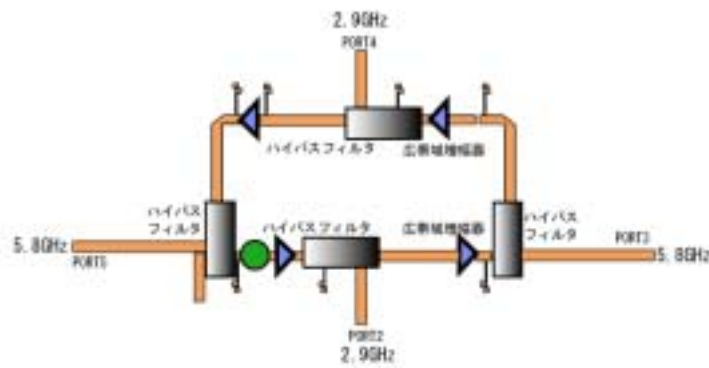


Fig.5 ループ発振器レイアウト

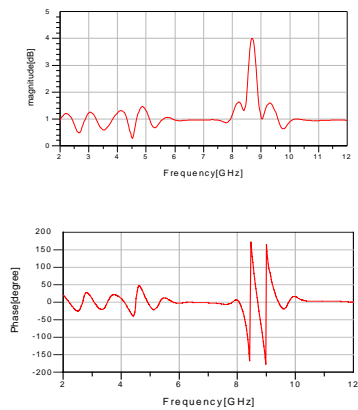


Fig.6 シミュレーション結果

ループ発振器の PORT3 および PORT5 に、アンテナ装荷を考えた際のパッチアンテナと増幅器の設計について Figure.7 にレイアウトを示す。入力側に増幅器を装荷した構造とし電磁界解析と回路シミュレータを用いて設計を行った。その際のシミュレーション結果を Figure.8 に示す。シミュレーション結果より装荷した増幅器は 5.8[GHz]において-31[dB]、通過特性 13.5[dB]の値を確認する事が出来た。またパッチアンテナにおいて Figure.9 より設計周波数 5.8[GHz]で、リターンロス-33[dB]という結果が得られた。また、アンテナ間隔はグレーティングローブ抑制を考慮した、 $0.8\lambda_0$ とした。



Fig.7 パッチアンテナ増幅器レイアウト

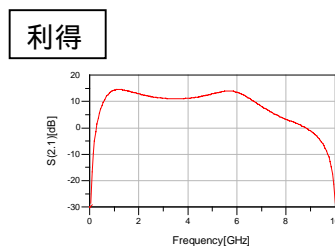
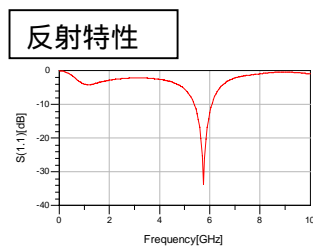


Fig.8 増幅器シミュレーション

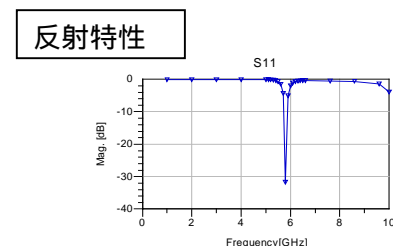


Fig.9 アンテナシミュレーション

## 4.試作評価

### 4.1 SSPS デモモデルの試作評価

ソフトウェアレトロディレクティブ機能を搭載したデモモデルの実験を行った。初めに、擬似太陽としてハコゲンランプを用い太陽電池に照射させ、システム動作の確認を行った。次に、設計した  $4 \times 4$  素子パッチアンテナに供給される位相差は 95 度スペックである、これよりビーム振れ幅が 24 度と決まる。この 24 度の方向に対してレトロディレクティブ機能を満足するように受電・送電アンテナの配置を決定し実験を行った。送電側のアンテナよりパイロット信号を送信したところ、受電側の直下 0 度では 0 度方向に送電され、パイロット信号の波源の位置を Y 軸方向に変化させたところ、ビームの追従を発光ダイオードの点灯により確認した。



## 4.2 ループ発振器 AIA 試作評価

ループ発振器とパッチアンテナを両面接地で AIA としたものをを用いて、電波無響暗室内にて実験を行った。実験には Signal generator、ホーンアンテナ、直流電圧電源×11 台、スペクトラムアナライザを用いた。2.9[GHz]の入力部分である PORT2.4 より、発振周波数である 8.7[GHz]で発振動作させるようにバイアスを調整し自励発振の確認をした。その実験結果をスペクトラムとして Figure.10 実験 1 に示す。ループ内部において 8.56[GHz]・-6.17[dBm]の自励発振を確認することが出来た。PORT2 および PORT4 共に同周波数を確認した。その際のバイアス条件は  $V_{gs1}=-0.17v$   $V_{ds1}=1.94v$   $I_{ds1}=20mA$   $V_{gs2}=-0.20v$   $V_{ds2}=3.30v$   $I_{ds2}=22mA$   $V_{gs3}=-0.20v$   $V_{ds3}=1.32v$   $I_{ds3}=6mA$   $V_{gs4}=-0.33v$   $V_{ds4}=2.28v$   $I_{ds4}=19mA$  である。次に、試作した発振器の自励発振である 8.56[GHz]に合わせて、Signal generator の入力信号を 2.92[GHz]に設定し入力を行った。アンテナ出力を得るために外部より 2.92[GHz]の信号を、Amp を介してループ発振器 AIA に入力を行い  $V_{gs1}=-0.07v$   $V_{ds1}=2.65v$   $I_{ds1}=23mA$   $V_{gs2}=-0.29v$   $V_{ds2}=1.90v$   $I_{ds2}=10mA$   $V_{gs3}=-0.34v$   $V_{ds3}=4.21v$   $I_{ds3}=23mA$   $V_{gs4}=-0.21v$   $V_{ds4}=0.43v$   $I_{ds4}=3.0mA$   $V_{gs5}=-0.09v$   $V_{ds5}=1.05v$   $I_{ds5}=5.0mA$   $V_{gs6}=-0.09v$   $V_{ds6}=1.36v$   $I_{ds6}=7.0mA$  のバイアスを発振器と増幅器の印加したところ、Figure.11 実験 2 に示すようなスペクトラムをホーンアンテナより確認した。5.8[GHz]において-39.5[dBm]、2.92 GHz]において-56[dBm]の測定結果を得ることが出来た。



Fig.10 実験 1 スペクトラム



Fig.11 実験 2 スペクトラム

## 5.まとめ

今回、デモモデルに新たに設計・試作し設置した、位相検出器 AD8302・マイコン制御により、24 度のビームシフトに対応したレトロディレクティブ機構が可能となった。今後の課題としては移送器の 4bit 化や、それに対応したマイコン制御が必要になる。

発振器を用いたレトロディレクティブの実験では差信号である 5.8[GHz]のアンテナ特性の出力を得られなかった。また、Phase Shifter を入力側に挿入し入力位相を変化させた所、スペクトラムの変化が見られた。これより課題として、発振器の Q-Factor や入力位相の変化による発振器の特性の考察が挙げられる。

## 参考文献

- [1] 伊藤康之、高木直 “MMIC 技術の基礎と応用”(株)リアライズ社、東京、1996 .
- [2] 高山洋一郎 “マイクロ波トランジスタ”(社)電子情報通信学会、東京、1998 .
- [3] R.A.York, "Nonlinear Analysis of Phase Relationships in Quasi-Optical Oscillator Arrays" IEEE
- [4] 吉田雄輝、寺田則幸、川崎繁男、佐々木進、田中孝治 “原型レトロディレクティブ AIA ” 信学技報 2002
- [5] 仁木洋平、山田修平、川崎繁男、大山龍一郎、田中孝治、佐々木進、七日市一嘉、篠原直毅、松本紘 “レトロディレクティブ機能を備えた平面型アクティブ集積アンテナアレイの検討” 信学技報 SPS2004-02
- [6] 横森信博 寺田則幸 川崎繁男 田中孝治 佐々木進 “SPS の電気機能モデルの試作と今後の展望” 信学技法 Technical Report of IEICE SPS, March.2004