

Synchronized reference control system by closed loop technique applying REV method

Atsushi YAMAMOTO[†] Hiroyuki SATO[†] Hiroshi IKEMATSU[†] Koji NAMURA[†] ,
and Shoichiro MIHARA[‡]

[†] Mitsubishi Electric Corp. 8-1-1 Tsukaguchi-Honmachi, Amagasaki-city, Hyogo, 661-8661 Japan

[‡] Institute for Unmanned Space Experiment Free Flyer 2-12 Kanda-Ogawamachi, Chiyoda-ku, Tokyo, 101-0052 Japan

E-mail: [†] Yamamoto.Atsushi@cb.MitsubishiElectric.co.jp

Abstract: Many studies have been performed about beam control system on SSPS transmission. One of the most common methods is a retro-directive system using pilot signal from the ground base station. However, unless each antenna has common synchronized reference signal, the transmitted microwave front from each antenna does not always match, consequently the combined microwave power decreases because of the specific phase delay or variation of antennas' position. To solve this problem, authors propose two concepts; (1) synchronizing the reference signal between the master and slave satellites by using closed loop technique, (2) controlling of each phase of transmitted wave from the satellites by utilizing the pilot signal and unique code from the base station.

In this report, first, the method to synchronize the common reference signal in master and slave satellites by using the closed loop technique is introduced and the result that the concept is confirmed on a wired examination is described. Then, a new concept is introduced that dynamically compensate phase of the high power transmitted wave by giving a corresponding phase to a phase shifter set in each satellite as a way to control the phase of each transmitted wave from the satellites by utilizing the pilot signal and REV(Rotating Element electric field Vector) method.

Keyword: Space Solar Power System, Wireless power transmission, Retro-directive system, Reference control, REV method

複数アンテナ間における源振統制システム

山本 敦士[†] 佐藤 裕之[†] 池松 寛[†] 苗村 康次[†] 三原 荘一郎[‡]

[†]三菱電機株式会社 通信機製作所 〒661-8661 兵庫県尼崎市塚口本町 8-1-1

[‡]財団法人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

E-mail: [†] Yamamoto.Atsushi@cb.MitsubishiElectric.co.jp

1. まえがき

宇宙太陽光発電システム(SSPS)では、各種の形式の発電衛星システムが提案されている[1-5]. 送電効率向上および他システムへの与干渉回避の観点から、送電アンテナのビーム指向制御の高精度化は最も重要な課題の一つである. このため従来から、地上の受電装置から宇宙の送電アンテナに送信されるパイロット信号に対し、レトロディレクティブ方式[6-9]により、受信波の位相共役となる送信波を生成する方式が検討され、位相共役の生成方法についてもさまざまな提案がなされている. 送電アンテナを単一の巨大構造物をして構成する場合には送信波の基準となる信号(基準源=源振)の同期は原理的に可能であるが、複数の衛星群で構成するシステムでは、基準源のコヒーレンシーを空間伝送により確保する必要がある. また、各衛星の相対位置がダイナミックに変化することも考慮せねばならない. 本課題の解決にあたっては、(1)衛星側で基準源を統一するハードウェアレトロ(以下 H/W レトロ)方式と、(2)パイロット信号により各衛星の送信波位相を制御するソフトウェアレトロ(以下 S/W レトロ)方式をトレードオフする必要がある. 本稿では、H/W レトロと S/W レトロの各特徴を示すと共に、SSPS における両方式の可能性について述べる.

2. H/W レトロと S/W レトロの特徴比較

図 2-1 に SSPS の源振統制システムイメージ図を示す.

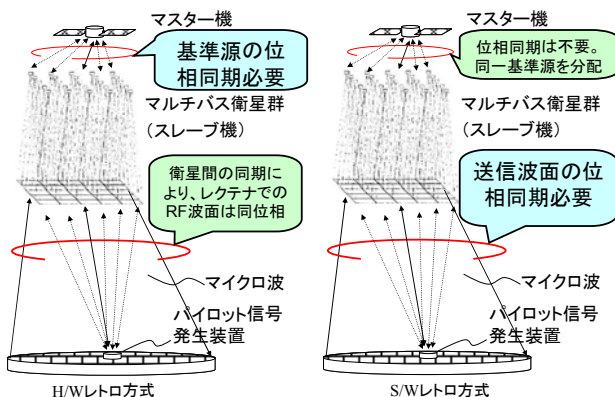


図 2-1 H/W レトロ, S/W レトロの原理を示す SSPS 源振統制システムイメージ図

H/W レトロと S/W レトロの各方式では、衛星間、及び地上-衛星間でそれぞれ特徴を有することがわかる.

また、表 2-1 に特徴比較をまとめる. 各方式の長所・短所を示す.

表 2-1 H/W レトロと S/W レトロの特徴比較

	H/Wレトロディレクティブシステム	S/Wレトロディレクティブシステム
長所	RF受信及びパイロット信号送信のみとなり、地上側の回路構成が容易	衛星側の基準源を無線分配するだけでよく、衛星側の回路構成が容易
短所	配線の引き直し補正等、衛星側の回路複雑	各衛星からのRFを同位相にする必要があり、地上側の回路が複雑

本稿では、各方式について以下のように記述する.

1. H/W レトロ方式源振統制システム

衛星側で基準源を統一する手法として、衛星群の一つをマスター機とし、その共通基準信号源をスレーブ機に同期させるため方法を紹介し、有線試験でコンセプトを確認した結果を述べる.

2. S/W レトロ方式源振統制システム

パイロット信号により各衛星の送信波位相を統一する方法として、受電部から各衛星単位で設けた移相器に対して位相量を設定することでダイナミックに衛星からの送信電力の位相を補正する方式についてコンセプトを紹介する.

3. H/W レトロ方式源振統制システム

3.1 検討システムと源振統制アルゴリズム

図 2-1 左に示した H/W レトロ方式のイメージ図において、基準信号を有する衛星をマスター機と称し、マルチバス衛星群をスレーブ機と称す. 但し、マスター機はマルチバス衛星群の一つでも良い.

スレーブ機の位置が変動しても影響を受けないマスター/スレーブ/地上間の周波数・位相同期システムの確立が必要である. このうち、スレーブ/地上間では、2004 年度に製作した H/W レトロの試作[10]により、実現性が検討されているため、ここでは衛星間に

焦点を絞る、源振統制の検証を行う。

図 3.1-1 に、源振統制システムの原理検証可能なブロック図を示す。具体的には 10MHz の基準信号を分配することで原理検証を行う。基準源周波数 10MHz の選定には、(i)基準源として用いる一般的な周波数であること、(ii)自由空間波長が 30m あり、位相の回転が遅く、誤差観測が容易なこと、を理由とした。

ここで、衛星は複数存在することが考えられるが、源振信号を変調(SS 変調含む)し、スレーブ機固有の情報に付加することにより、各スレーブ機で識別することが可能であると考えられるため、今回の原理検証では省いている。

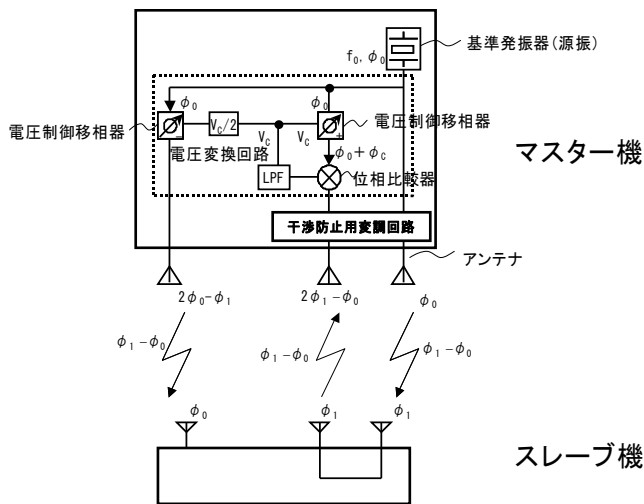


図 3.1-1 源振統制システムブロック図

源振統制のアルゴリズムは以下の通りである。マスター機の源振信号を分配し、スレーブ機の間で閉ループを組むことにより、2 機の距離に対応する位相を移相器を用いて補正する。同時に得られた DC 成分から、マスター機とスレーブ機の位相量が判明する。

ここで、マスター機とスレーブ機は互いに移動しており、距離は一定ではない。しかし SSPS 実用システムで想定する衛星群は一般に、衛星間の距離時間変化率はオーダとして 0.01Hz~0.0001Hz と長周期の緩やかな変化であると考えられる。このため、クローズドループの本源振統制システムにおいては大きな問題とはならないと考えられる。

3.2 源振統制システムの製作・試験

3.2.1 単体試験結果と位相誤差目標値の設定

図 3.1-1 に示すマスター機の製作を行うに先立ち、主要部品である移相器の単体特性の確認を行った。図 3.2.1-1 に移相器 5 台単体の通過位相特性実測値と、データシートにおける公称値を示す。

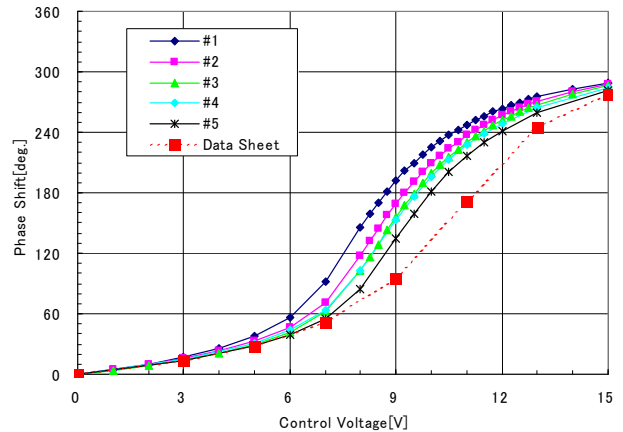


図 3.2.1-1 移相器の通過位相特性

上図から、#3 と#4 の特性はよく一致しているものの、個体差によるバラツキが大きく、データシートとの乖離がマスター機の性能に影響を及ぼす程大きいことが判明した。また、本移相器は 6V~10V の間では、0.1V で 5° の位相差を生じることは明らかである。

今回の原理検証では移相器の特性を汎用測定器を用いて人的作業で読み取っているため、±0.1V 程度の誤差が発生するため、±5° (10° p-p) の位相差を、本測定における許容範囲と設定する。本位相差は詳細なテーブル値を予め保持すれば解決する問題であり、実用時には高精度な設定が可能である。

3.2.2 マスター機の製作・試験

図 3.2.2-1 に、ネットワークアナライザ (NWA) にて位相評価を行う際の、マスター機のブロック図を示す。NWA の Port1 出力には、増幅器を配置して、ミキサへの入力レベルを増加させた後、電力分配器(DIV)にて 3 分配する。

出力#1 はケーブル、移相器#5 等で位相量を与えられて、ミキサの LO 端子に入力される。

出力#2 は補正用の移相器#3 により位相を与えられ、ミキサの RF 端子に入力される。

出力#3 は NWA のポート 2 側へ折り返し、この時、いわゆるスレーブ側に半分の逆位相量を与えて電波を送出することを模擬しており、移相器#1、#4 にて位相量を与えている。

電圧変換回路 1 は、ミキサから出力されてループフィルタで濾波された DC 成分 (V_{in}) を、オフセット電圧 (V_{offset}) と可算することにより移相器が動作する範囲まで底上げし、倍増させるために使用する。

電圧変換回路 2 は、移相器#3 に対して半分の位相量を移相器#4 に与えるための電圧変換回路として用いる。

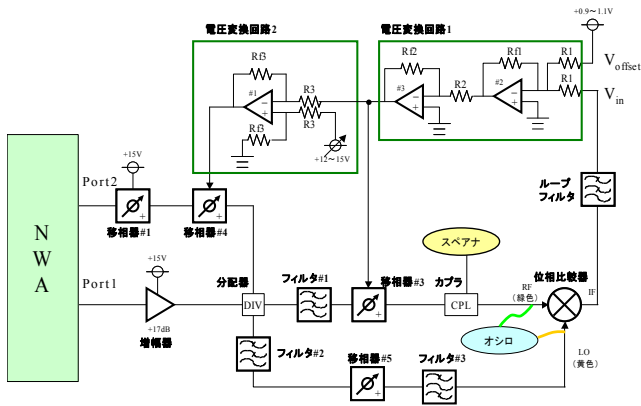


図 3.2.2-1 位相同期評価時の詳細ブロック図

上記ブロック図を実現した源振統制システム評価用試験系の外観を図 3.2.2-2 に示す。

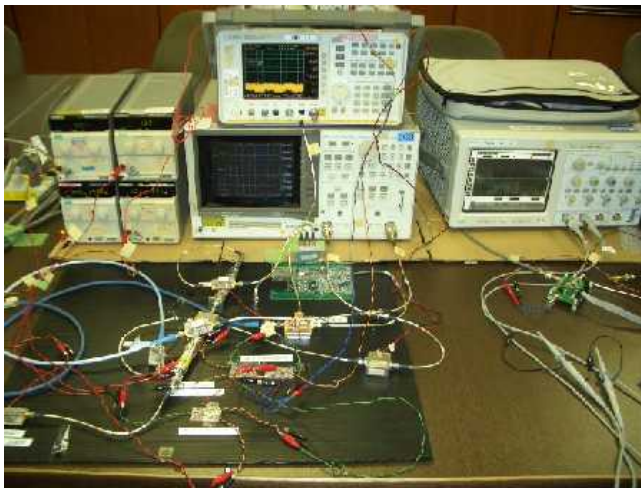


図 3.2.2-2 源振統制システム評価用試験系外観図

3.2.3 試験方法と試験条件

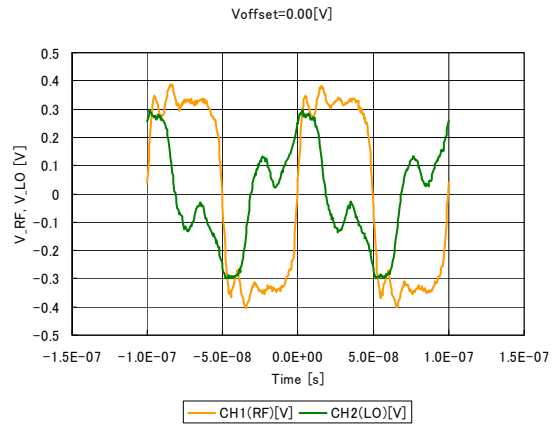
スペクトラム波形のモニタは、方向性結合器 (CPL) の結合ポートから、スペクトラムアナライザ (スペアナ) により確認を行う。また、位相同期の確認はデジタルオシロスコープ (オシロ) を用い、位相比較器の端子をモニタして行った。

マスター/スレーブ間の距離の変動を模擬し、距離変動時の追従性を確認するため、移相器#1 による位相変化が 30° または 60° となるよう制御電圧を変化させる方法と、2m の同軸ケーブルを挿入して行った。

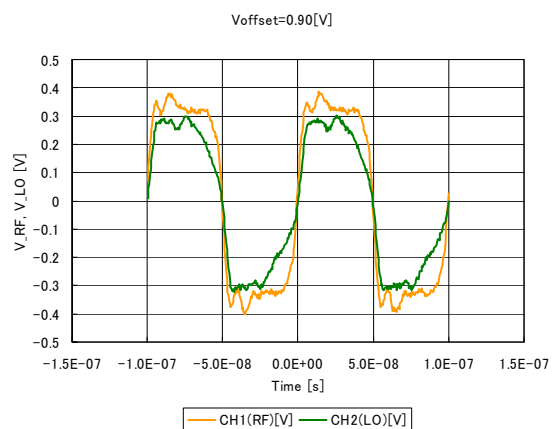
3.2.4 位相同期評価結果と考察

源振統制システムの位相同期評価結果を図 3.2.4-1 に示す。

$V_{\text{offset}} > 0.9V$ となった際、オシロで観察している時間波形において、RF の波形に LO 波形のトリガがかかり、波形が一致する。表 3.2.4-1 に、NWA で測定した位相誤差の評価結果を示す。



(a) 位相同期前 (Voffset=0.0V)



(b) 位相同期後 (Voffset=0.9V)

図 3.2.4-1 位相比較器の時間波形 (LO 端子)

表 3.2.4-1 ケーブル変化に伴う NWA 位相差

	Port1-2 間位相差	基準状態 からの位相 差	位相補正 の手段	備考
基準状態	-4.7°	0°	移相器	位相補正を行った初期値
$\Delta 2L = -30^\circ$	-5.6°	-0.9°	移相器	マスター/スレーブ間の往復距離を 30° 長伸ばした(遅延させた)。
$\Delta 2L = -60^\circ$	-3.9°	$+0.8^\circ$	移相器	マスター/スレーブ間の往復距離を 60° 長伸ばした(遅延させた)。
$\Delta 2L = -17.38^\circ$	-2.5°	$+2.2^\circ$	ケーブル	セミリジッドケーブル 2m は -17.38° に相当。

ここでは、移相遅れをマイナス符号で示している。また、 $\Delta 2L$ は往復分の距離変動を表している。なお、表 3.2.4-1 中の Port1-2 間位相差とは、マスター機に搭載している基準源の出力端子 (Port1) と、スレーブ機に投入された基準源の入力端子 (Port2) を模擬しており、位相差が 0° であれば、マスター機/スレーブ機の位相同期が理想的な状態で確認されたとと言える。

引き回し線路の位相補正を行った状態 (表 3.2.4-1 における基準状態) では、 -4.7° の位相差が観察された。同様に、移相器#1 で 30° 、 60° の移相量を設定すると、それぞれ -5.6° 、 -3.9° が観察された。一方、

17.38° に相当する 2m のセミリジッドケーブルを挿入すると -2.5° の位相差を得る。基準状態を基準として、位相誤差を再計算すると、今回の試験の範囲では、セミリジッドケーブルを挿入した際の 2.2° が最大の位相誤差となる。3.2 節で述べたように、位相誤差の範囲は ±5° 以内であり、本測定結果が位相同期を原理検証するために、有意な結果を得たことが証明された。

4. S/W レトロ方式源振統制システム

4.1. 検討システムと源振統制アルゴリズム

一方、ソフトウェア的手法を用いて源振統制システムを実現することも可能である。図 4.1-1 に S/W レトロ方式の源振統制システムイメージ図を示し、以下にアルゴリズムを説明する。

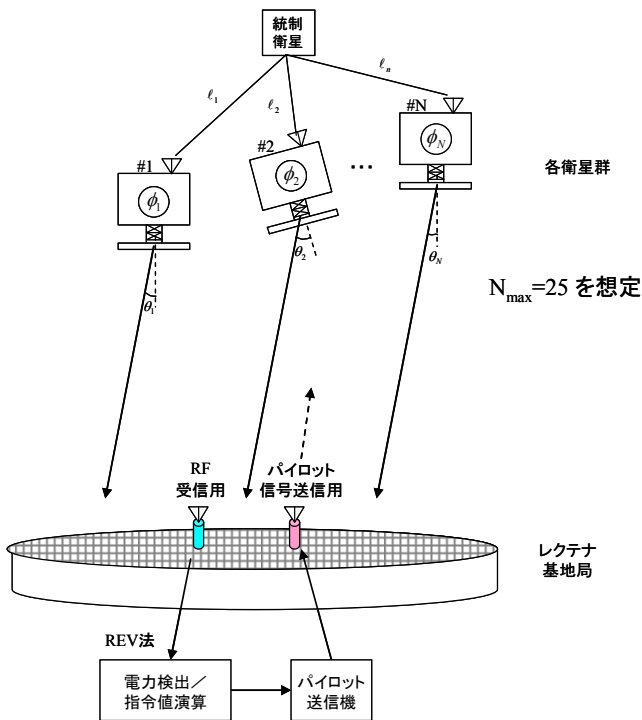


図 4.1-1 S/W レトロ方式の源振統制システム

<アルゴリズム>

1. 衛星側回路の単純化のため、統制衛星で周波数同期した基準源を各衛星群に対して無線分配を行う。
2. 振幅モノパルス方式を用い、パイロット信号によって各衛星をレクテナ基地局の方向に追尾させる。
3. 各衛星の送信波の同期を取るため、各衛星に独立した移相器を設け、受電部に設けた源振統制受電制御部で生成した制御信号から受電部で得られる電力が最大になるように各移相器を制御する。

要は、衛星間では位相同期を行わず、基準源を無線分配するのみであり、地上のレクテナ基地局から送信されるパイロット信号の方向に、各衛星群から大電力 RF を送付する電力を最大にするように、REV 法[11]を用

いて各衛星からの RF 位相を調整している。

4.2. システム構成と手順

図 4-2 に、各衛星群の内部構成ブロック図を示す。この構成により、各衛星群はパイロット信号を受信して振幅モノパルス方式で追尾するとともに、各衛星に割り当てられた識別符号を復調することで衛星側で位相制御の有無を判断しながら位相を制御し、レクテナ基地局側に大電力 RF を送電することが可能である。

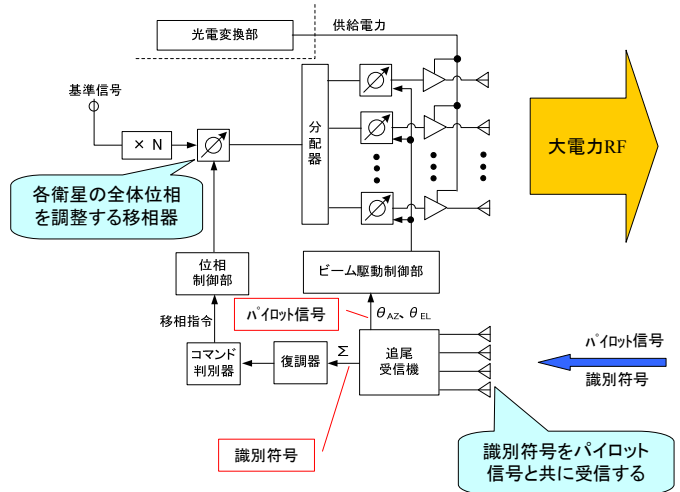


図 4-2 源振統制システム内部構成ブロック図

図 4-3 にフローチャートを示し、各項目の説明を 1 ~ 8 に示す。

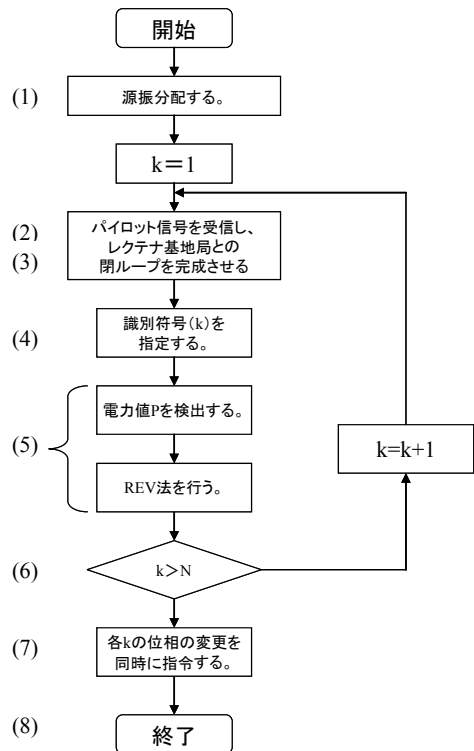


図 4-3 S/W レトロ方式フローチャート

1. 源振統制を行う衛星から、各衛星群に対して、同一基準源を無線分配する（非同期）。
2. 各アンテナ（#k）（ $1 \leq k \leq N$ ）はパイロット信号により S/W レトロ（振幅モノパルス）方式を用いてレクテナの方向 θ_k を検知する。
3. 各アンテナ（#k）は θ_k 方向へビームを指向する。
4. 衛星全体をアレー動作させるため、各衛星ごとにもう一つの移相器を配置し移相量 ϕ_k を定める。
5. 合成された RF をアンテナにおいて受電し、REV法を用い、受電電力が最大となる ϕ_k を検出する。
6. ここでは ϕ_k は更新せず、各衛星は初期状態で同じルーチンを繰り返す。
7. 全ての ϕ_k の指令値を演算してパイロット信号と共に衛星側に送信する。
8. 各アンテナ（#i）は θ_k 方向へビームを指向しつつ、 ϕ_k の位相差をもってビームを送信する。

4.3. 問題点

本方式には、以下の課題が存在する。

- (1) ループ速度：36000kmの往復には光速で0.24sec必要である。REV法での処理は10msecとして、計0.25sec。移相器の動作時間は無視できるほど短いと見做し、REV法の処理を各衛星ごとに行うとすれば、衛星が25機存在するとして $0.25\text{sec} \times 25 = 6.25$ 秒。静止軌道衛星上のドリフトは1m/12hrであり、0.15mm/6.3secに相当する。0.15mmは5.8GHzで約1degに相当するため、この程度の位相ずれであれば、振幅変化は無視できるものと考えられる。
- (2) 微弱信号と大電力間のS/N比：パイロット信号周波数への大電力RFの漏れ込みを回避するためS/N比が必要。
- (3) 位相補正：各素子の位相を揃えるため、衛星内部でのRF周波数の分配には等長配線が必要。

5. まとめ

■ H/W レトロ方式源振統制システム

基準源を統一することで、地上からのパイロット信号を受信すれば、共役位相の関係によって、複数衛星からの電波の波面が一致し、地上のレクテナサイトに同位相で送電することが可能である。

■ S/W レトロ方式源振統制システム

衛星側で基準源を統一しなくとも、地上レクテナサイトでの受電電力が常に最大値となるよう、衛星の根元の移相器に対して順次、位相量を設定することで地上レクテナサイトでのRF位相を揃え、ダイナミックに衛星からの送信電力を制御可能な見通しを得た。本検討では25機までであるが、実用SSPSを見据えた制御グループ数については今後の検討とする。

6. 今後の展開

H/W レトロディレクティブ方式を用いた源振統制システムでは、基準源を統一することで、地上からのパイロット信号を受信すれば、共役位相の関係によって、複数衛星からの電波の波面が一致し、地上のレクテナサイトに同位相で送電することが可能である。

一方、S/W レトロディレクティブ方式を用いることで、地上レクテナサイトから各衛星の移相器に対して位相量を設定することでダイナミックに衛星からの送信電力の位相を補正し、地上レクテナサイトでの受電電力を制御することが可能である。

文 献

- [1] M. L. Stancoti, et.al., "Space solar power :A fresh look feasibility study-Phase I report", Report SAIC-96/1038 Space Application International Corporation for NASA LeRC Contract NAS3-26565, Schaumburg, Illinois,1996.J.C.
- [2] J. C. Mankins, "A fresh look at the concept of space solar power", Proc. of SPS'97, Montreal, S7041, 1997.
- [3] S. Sasaki, Y. Naruo and M. Nagatomo, "Engineering research for solar power satellite SPS2000", Proc. Of SPS'97, Montreal, pp.73-77, 1997.
- [4] 宇宙航空研究開発機構, "JAXAにおける宇宙エネルギー利用システム(SSPS)研究の現状", 信学技報 SPS2008-01, 2008.
- [5] 財団法人無人宇宙実験システム研究開発機構, "SSPSに関するUSEFの活動状況(2007年度)", 信学技報 SPS2008-02, 2008.
- [6] K. Hashimoto, K. Tsutsumi, N. Shinohara, and H. Matsumoto, "Beam Control System with Spread Spectrum Pilot Signals for Solar Power Satellite", Proc. of URSI,p.1284(H Special P7), August 2002.
- [7] N. Kaya, "Development and Demonstration of New Retrodirective Antenna System for Solar Power Satellite of Sandwich Structure", Proc. International symposium on Antenna and Propagation, Vol. 3. pp1419-1422. 2000.
- [8] 林山晋也, 日景隆, 野島俊雄, 大宮学, 伊藤精彦, "DSPを用いたパイロット信号方向検知システムの基礎的研究", 平成14年度電気関係学会北海道支部連合大会, 151, Oct, 2002.
- [9] 吉田雄輝, 寺田則幸, 青山洋光, 川崎繁男, 佐々木進, 田中孝治, "原型レトロディレクティブアクティブ集積アンテナの試作", 信学技報, ED2001-212-223, pp.45-50, Jan. 2002.
- [10] 水野友宏, 西田和広, 桶川弘勝, 高田和幸, 池松寛, 佐藤裕之, USEF-SSPS 検討チーム, "ヘテロダイン方式ハードウェアレトロディレクティブアンテナの開発", 第48回宇宙科学技術連合講演会講演集, 2004, pp.98-102.
- [11] 真野清司, 片木孝至, "フェイズドアレーアンテナの素子振幅位相測定法--素子電界ベクトル回転法--", 信学論, Vol. J65-B, No5, pp.555-560, May 1982.