

## A self steering array and its application to phase synchronization of transmitter units and SSPS \*

Kozo Hashimoto, Hiroki Shibata<sup>1</sup>, and Hiroshi Matsumoto  
Research Institute for Sustainable Humanosphere  
Kyoto University Gokasho, Uji, Kyoto, 611-0011

<sup>1</sup>Now at Ministry of Land, Infrastructure and Transport Government of Japan

### Abstract

SHARP (Stationary High Altitude Relay Platform) is a platform consisting of an aircraft powered by microwave energy sent from the ground. A unique self-steering array which automatically tracks the receiver (the spacecraft) by adjusting phase shifters by  $\pm 90^\circ$  based on its altitude and the reception intensity on the ground was used.

We propose a revised system which does not require the altimeter and converges faster. This system changes the phase shifters by  $0^\circ$  and  $180^\circ$  in addition to the  $\pm 90^\circ$  shifts. When a system is so large like SSPS, the array would be composed of a lot of units. The system is too large to distribute a reference signal generated by a single reference oscillator. Although the beam steering is possible in each unit, a beam radiated from a unit could cancel that of another one depending on the phases of their reference signals. If independent oscillators are used, their requirement for the stability and accuracy could be quite strict. Although their frequency can be synchronized, it would be difficult to adjust the phases. The phase of each reference oscillator could be adjusted using the self-steering technique if each unit works under its own retrodirective system.

When the distance between the transmitter and the receiver is large, the propagation delay makes the response time longer. We also propose a new method which overcomes this delay by changing the phases preemptively before obtaining the calculated values.

---

\*Present at the 7th SPS Symposium, 16-17 September, 2004

# 自己ビーム制御アレイと SPS ならびに位相同期システムへの応用<sup>1</sup>

橋本弘蔵、芝田裕紀\*、松本紘  
京大生生存圏研究所、\*国土交通省  
Email: kozo@rishi.kyoto-u.ac.jp

## 1 はじめに

SSPS においては、受電点からパイロット信号を送信し、その到来方向に送電するレトロディレクティブ方式がとられる。一方、SSPS のような大型システムでは、多数のユニットから成り立つ。その場合、ユニット毎ではビームを向けるように動作するが、ユニット間も基準の位相がそろって保証はなく、最悪打ち消しあうこともあり得る。そのために、ユニット間の位相同期をとることができるシステムを提案する。

レトロディレクティブ方式のアレイアンテナでは、受電点から送信されたパイロット信号を送電側に設置された受信アンテナアレイで受け、各受信信号と基準信号との位相を比較して、位相差を測定し、それぞれの位相差を基準信号に対して反転させ、その信号を増幅して各アンテナの移相器に与える仕組みとなっている [1]。そうすることで、アンテナの配置に関わらず、自動的にかつ高速に、パイロット信号の方向へメインビームが向くような指向性になる位相（位相共役）で送電アンテナアレイから送電することが可能となる。

送電側には基準信号が必要であるものの、SPS のような大規模フェイズドアレイの場合、同位相の基準信号を数 km に渡って 1 つの源振から分配するのは難しい。有線もしくは無線で各アンテナに基準信号を送った場合、位相を統一することが困難である。そこで、この問題を解決するには、複数の周波数が同一の基準信号を作り、その複数の基準信号の位相の統一を図ることが最も現実的である。以後、広範囲に基準信号を分配するには、複数の基準信号を作り、その基準信号の位相を統一する方法を用いることを前提とする。

## 2 SHARP システム

SHARP システム [2] とは Stationary High Altitude Relay Platform の略で、地上から送信されたマイクロ波を動力源とする成層圏無線中継用飛行機のことである。本稿では、SHARP システム全体のうち、マイクロ波送電における位相制御に関する部分を扱う。SHARP システムは、1980 年代後半にカナダ通信省で情報通信等を目的とし、提案、開発されたものであった。約 21km 上空を飛行するレクテナを搭載した無燃料の飛行機に対し、マイクロ波の位相を独特の方法で制御しながら送信する。小規模の SHARP システムの実験は 1987 年にカナダのオタワで、カナダ通信研究所により行われている。

### 2.1 SHARP システムにおける位相制御方法の原理

本稿では、フェイズドアレイユニット間の位相制御を目的としているが、SHARP システムは、フェイズドアレイの個々のアンテナ間を位相制御するシステムである [2]。原理を説明するにあたり、ここでは説明を簡単にするため、個々のアンテナ間の位相制御を前提として説明する。

地上のフェイズドアレイからマイクロ波ビームを送信し、レクテナで受信する。マイクロ波を送信する際、アレイアンテナからアンテナを一つ選び、そこから送信されるビームの電界ベクトル（図 1 の  $A$ ）を  $\pm 90^\circ$  位相を変化させる。（図 1 の  $A'$  と  $A''$ ）この結果、マイクロ波ビームは振幅が変動するが、レクテナで受信された信号から直流成分を取り除いた上で時間平均をとると、 $\sin p$  成分に比例した成分を取り除くこと

<sup>1</sup>第 7 回 SPS シンポジウム、九州工業大学にて 2004 年 9 月 16-17 日開催

ができる。ただし  $p$  とは位相誤差を示す。また、図1の  $R'$ 、 $R''$  はそれぞれ、 $A$  の位相を  $90^\circ$  を進めたとき、もしくは  $90^\circ$  遅らせたときのアンテナアレイ全体から得られる全ての電界ベクトルを合成したものを示す。

式で示すと以下ようになる。

$$A = Rk e^{-j p} \quad (1)$$

とおけるとする。ただし  $k$  は定数で、アンテナの数の逆数である。

$$A' = Rk e^{-j(p - \frac{\pi}{2})} \quad (2)$$

$$A'' = Rk e^{-j(p + \frac{\pi}{2})} \quad (3)$$

すると、 $R' = R + A'$ 、 $R'' = R + A''$  より、

$$|R'| = |R| \sqrt{(1 + 2k \sin p)^2 + k^2 \cos^2 p} \approx |R|(1 + k \sin p) \quad (4)$$

ただし、 $k \ll 1$  (アンテナの数が多いとき) である。また同様に

$$|R''| \approx |R|(1 - k \sin p) \quad (5)$$

となり、以上より

$$|R'| - |R''| = 2|R|k \sin p = 2|A| \sin p \quad (6)$$

となる。

このようにして得られた  $\sin p$  に比例した成分を、高度計を用いて、振幅の減衰分を補正し、振幅で式 (3.6) を割つたものを  $\arcsin$  回路へ送り、その出力から位相誤差  $p$  を得る手法が SHARP システムでの方法である。その情報をもとにフェイズドアレイの移相器を操作し、正しい位相を更新する。以上の操作をそれぞれの送信アンテナに対して繰り返していくと、最終的に目標物のある所望の方向へ、メインビームを最大にすることができる。

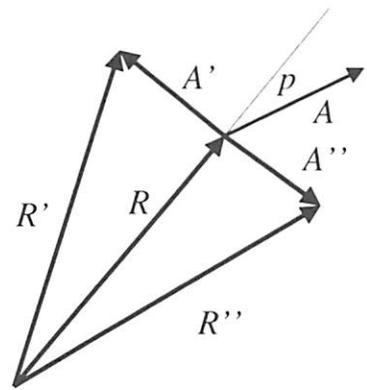


図1: レクテナでの電界ベクトル図

## 2.2 シミュレーションとその考察

図2は、以上の原理をもとに、フェーズドアレイアンテナが100本あり、かつ初期位相がランダムに与えられている場合について、C言語を用いてシミュレーションを行った結果である。図2において、位相誤差は更新回数とともに0へ収束していくのがわかる。ところが、その中であつて、収束度合いの低いものがある。これは、位相誤差の絶対値が  $90^\circ$  を越えてしまったためである。つまり、このシステムでは位相誤算の  $\sin$  成分しか検知できないので、仮に  $170^\circ$  度の位相誤差があつたとしても、 $\arcsin$  回路の出力は  $10^\circ$  度となつてしまい、位相誤差が実際の値よりも小さく見積もられてしまうのである。そこで、位相の全角度において正しい位相誤差を検知できるように、位相誤差の  $\sin$  成分だけでなく、 $\cos$  成分も取り出すように改良を行った。その改良されたシステムが次に説明するIQ法である。

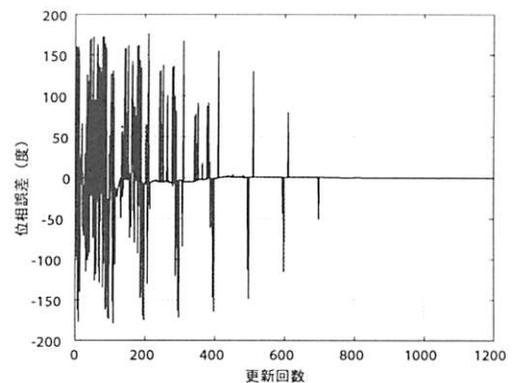


図2: SHARP システムにおける更新回数に対する位相誤差の変化

### 3 IQ法

位相同期方式やSPSへの応用を目的として行つたSHARP方式の改良について述べる。本方式では、高度計を不要とした他、処理も高速化されている。

#### 3.1 IQ法の原理

SHARPシステムにおける位相制御方法では90度、位相を進ませたり遅らせたりした。さらに、位相を0度と180度進ませることとし、IQ法と名づけた。

図1のベクトルAを180度回転させたベクトルをBとし、そのときの全体の振幅を|B'|とする。

$$B = Rk e^{-j(p-\pi)} \quad (7)$$

としたとき、 $B' = R + B$ であるから

$$|B'| = |R| \sqrt{(1 - k \cos^2 p)^2 + k^2 \sin^2 p} \approx |R|(1 - k \cos p) \quad (8)$$

となる。また、同様に

$$|A + R| \approx |R|(1 + k \cos p) \quad (9)$$

となる。従つて、

$$|A + R| - |B'| = 2|R|k \cos p = 2|A| \cos p \quad (10)$$

となる。

従来の方で得られる位相誤差の $\sin p$ の情報に、この方法で得られた $\cos p$ の情報を勘案することにより、全角度の位相誤差を認識することが可能となる。

さらにSHARPシステムでは、位相誤差を求める際、前述のように伝搬により生じたマイクロ波の振幅の減衰を補正する必要がある。その減衰を補正するには高度計を使って高度を測定し、その高度を振幅に乗算する方法が行われている。しかしIQ法では、式(5)と式(10)から、マイクロ波の振幅の減衰がどの程度であるかわからなくとも、さらに、マイクロ波の振幅がどの程度なのか分からなくとも、より正しく位相誤差 $p$ を求めることができるので、高度計を必要としないという長所がある。また、このIQ法を用いた場合のシミュレーションを行つた。その結果を図3に示す。100回の更新を行つた後、位相誤差がほぼ0に収束している。1回の更新にかかる時間が、位相を180度回転させることを考慮し、IQ法の方がSHARPシステムの方法より仮に2倍多くかかるとしても、IQ法の方が1.5倍早く収束していることがわかる。

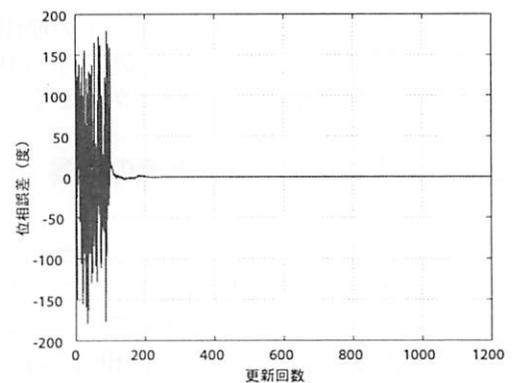


図3: IQ法における更新回数に対する位相誤差の変化

#### 3.2 IQ法のユニット型SPSへの適用

次に、IQ法をアレイアンテナのアンテナの一つずつ適用するのではなく、フェイズドアレイユニットの基準信号に対し適用していくことにする。これは、同じ時間内により多くのアンテナを処理できるようにするためである。よつてここから先では、レトロディレクティブ法との併用を前提とする。

図4は、基準信号の位相を統一を目的として、IQ法をユニット型SPSに適用した場合のシミュレーション結果を示したものである。10個のフェイズドアレイユニットがあり、ひとつのユニットには10本の送電アンテナから構成されたアンテナアレイが搭載されている。また、図4の横軸のアンテナ番号とは、フェイズドアレイユニット毎のアンテナを1次元に配列したとき、一つ一つに割り振った番号のことであり、番号の小さいものから10個毎に、一つのフェイズドアレイユニット内に収まっているものとする。IQ法の操作前を緑線で表しており、ユニット内の位相は、レトロディレクティブ法により、きれいに位相が揃っているものの、ユニット間の位相（基準信号の初期位相）はまったくランダムに与えられている。つまり全体としては、全く位相が揃っていない。この状態にIQ法を施すと、青線で示したように一直線に位相が揃うことがわかる。つまり、フェイズドアレイユニットの基準信号が同相になっていることがわかる。図4はユニットが10個の場合であるが、同様に、ユニットが400個、1万個の場合も基準信号が同相になることが確かめられた。

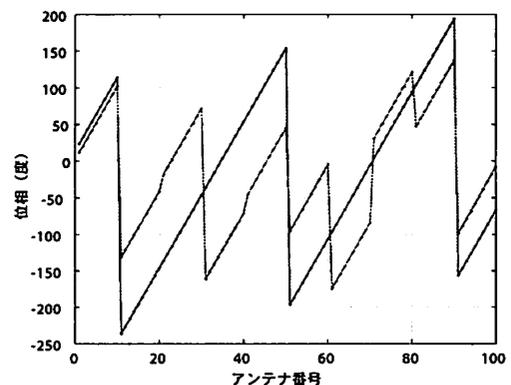


図4: ユニット型SPSにおけるIQ法適用前後での基準信号の位相

ここで生じる大きな問題として、処理速度が挙げられる。このIQ法を静止軌道にあるユニット型SPSに適用する場合を考えると、往復伝播時間が0.24秒かかる。従って、更新一回に $0.24 + \alpha$ (計算時間)秒と仮定すると、ユニットが5万個あった場合、すべての位相が揃うまで7時間以上かかることになる。

## 4 先取り法

IQ法ではフェイズドアレイユニットの基準信号の位相を統一までにかかる時間が膨大なものとなってしまう。本章では、その解決法としての「先取り法」について詳しく述べる。先取り法を説明するにあたりその基礎となる、IQ法の時間系列でのシステムの動きを詳しく見ていくことにする。

### 4.1 先取り法の原理

まず第一の段階では、ユニットを一つ選択し、そのユニットの基準信号の位相を4段階(0、90、180、270(-90)度)動かす。そして、伝搬時間だけ遅れてレクテナにおいて受信されると、そこで、位相誤差を算出し、それを今度はユニット側へ送信する。そして、また伝搬時間だけ遅れてユニット側で受信し、最後に基準信号の移相器へ位相誤差の情報が送られて、位相が正しく更新される。以上の操作を繰り返していくのがIQ法であった。この操作において、移相器に注目していくと、移相器は常に断続的に動作していることがわかる。つまり、一つのユニットに対し、位相変化を行ってから、次の位相変化を行うまで、どの移相器も動いていない時間が存在するのである。そこで、先取り法と呼ばれる方法では、時間節約のため、移相器を順次連続的に動かし(位相誤差の算出結果を待たない)、SPSの規模に応じた伝搬時間等の時間遅延ののち、位相を更新していくのである。この方法では、更新一回あたりの収束度合が劣化するが、更新一回あたりの時間が大幅に短縮できるので、結果的に早く収束することができる。このように重畳的なことができるのは、SPSのような高度の高いシステムと地上の更新の間に、大きな遅延時間が生じるためであり、SHARPシステムが想定している、21km程度の距離では、この方法はあまり意味のあるものでなくなってしまう。

先取り法のシミュレーションを行うにあたり、まずはIQ法と先取り法を比較を行った。両者を比較するため、細かくパラメータを設定する必要がある。ここでは収束にかかる時間を比較するため、時間的なパラメータを設定した。

まず、ユニットはIQ法との時間的な比較が比較しやすい400個とし、高度は500kmとする。これらのパラメータは、近い将来実施を希望している電力実験衛星のパラメータに近いものである。また、ユニットの高度が500kmであることから、マイクロ波の伝搬にかかる片道の時間は1.66msとなる。さらに、この位相変化にかかる時間を0.5msとすると、レクテナ上での振幅変化の測定時間は、同じ0.5ms必要となる。また位相誤差の算出に0.5ms、位相更新に0.5msそれぞれかかるとする。これらの数値は、参考文献[2]において、著者が行ったシミュレーションのパラメータをもとに算出したものである。なお、参考文献[2]では、伝搬距離が21kmに対して一更新が2m秒としてパラメータを設定している。よって、IQ法の場合、更新1回に4.82msとなる。上記の結果を時間系列でまとめると、IQ法は図5となる。先取り法の場合は、最初の位相変化の後に、次のシーケンスが始まるために、更新1回が0.5m秒に高速化される。

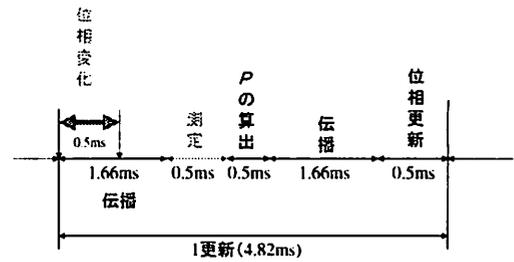


図 5: IQ法における更新時の時間系列

## 4.2 先取り法のシミュレーション

上記のパラメータを用いて、シミュレーションを行った。その結果を図6に示す。図6の示すように、先取り法(青)の方が、IQ法(赤)に比べ早く電力(理想電力に対する相対値)が100%に収束しているのが分かる。SHARPシステムの更新過程の一部の重畳を行っても、理論的に収束し、かつ高速化されているのがわかる。ただし、原理で述べたように、更新一回あたりの収束度が劣化するので、図6を見て分かるように、95%近くまで一気に収束するものの、それ以降の収束具合が鈍化している。

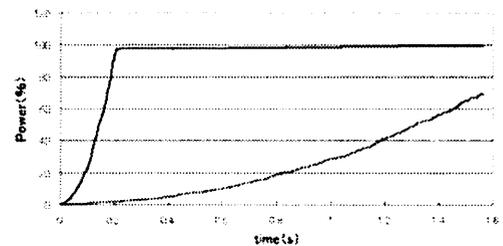


図 6: IQ法と先取り法の比較

## 5 むすび

基準位相を合わせることができないような、大規模なフェイズドアレイシステムの位相制御について、新しい方法を開発し、その特性およびユニット型SPSに応用した結果をシミュレーションにより評価した。しかし、一つ一つのユニットの位相を更新していくので、位相が統一されるまで非常に時間がかかるという短所がある。そのため、更新操作を一部重畳させた先取り法による高速化を示した。

SPSへの応用について考えたばあい、本稿でのべた方式は、位相を変化させたことによる総合的な振幅の変化を利用している。したがって、その変化量が雑音レベルよりも小さい場合、その変化が検出できなくなる。一つのユニットの位相変化による振幅変化の検出可能なレベルから応用できるシステムのユニット数が決まり、残念ながら巨大なシステムには応用できない。

## 参考文献

- [1] R. Y. Miyamoto and T. Itoh, IEEE Microwave Magazine, vol. 3, no. 1, 71-79, March 2002.
- [2] Thomas W. R. East, A Self-Steering Array for the SHARP Microwave-Powered Aircraft, IEEE Transaction on Antennas and Propagation, vol. 40, no. 12, December, 1992