

Direction of Arrival Estimation with Automatic Calibration System for SPS *

Masatoshi MATSUMOTO, Kozo HASHIMOTO, Hiroshi MATSUMOTO

Kyoto University

Gokasho, Uji-shi, Kyoto 611-0011

Abstract

In SPS (Solar Power Station), it is necessary to transmit microwave power generated in space to a rectenna site on the Earth correctly by a beam control. To transmit microwave power from the geostationary orbit to a rectenna site with a diameter of 2km on the Earth, the solar power satellite has to be able to estimate a pilot signal direction of arrival (DOA) in $10^{-3}\sim 10^{-4}$ degree of accuracy. But, the difference of each pilot signal receiver characteristics causes an error in DOA and it is serious in order to realize such high precision. Piece-to-piece variations of devices, secular changes, and failure of equipments are cited as main causes of the difference. We have been studying a method of estimating DOA with an automatic calibrating function, and it has turned out that DOA estimation result is affected badly when the mean of phase errors which are added in passing receivers is not zero. In this research, we develop a DOA estimation method which is not influenced by such errors.

This DOA estimation method is a technique to eliminate the difference caused by the above errors by using pilot signal receiving data for two directions. A constrained condition is that the angle between the directions of the two signals is necessary. Moreover, two receiving data should be required in a short time, not necessarily the same time. We simulated the case that the phase errors added to receiving data are scattered at random within ± 90 degrees. As a consequence, the DOA estimation accuracy of 10^{-3} degree was acquired in the case that there were no errors in the given angle between the two signals. If there is an error of 1km in the SPS altitude of 36000km, the accuracy of $10^{-2}\sim 10^{-3}$ degree was acquired. Consequently, it is possible to detect the terrestrial source of a pilot signal at pinpoint from a satellite on a geostationary orbit with this method, if there are no problems in the positioning accuracy of a satellite.

* Presented at 7th SPS Symposium, 16-17 September, 2004

SPSの到来方向検出のための自動較正システム^{注1}

松本真俊, 橋本弘藏, 松本紘 (京都大学)

611-0011 京都府宇治市五ヶ庄

mmatsumo@rish.kyoto-u.ac.jp

要旨: SPS(Solar Power Station) では, マイクロ波の送電方向を決定するために, 地上のレクテナサイトから発電衛星に送信するパイロット信号を用いる。SPS での到来方向検出は高精度であることが不可欠だが, 衛星に搭載する到来方向検出用のパイロット信号受信機の性能には, 製造段階での個体差, 長期使用により生まれる受信機の特性変化といった機器ごとの差異が生じる。それはランダムな誤差として受信信号の処理用データに含まれ, 時に線形的な誤差となり検出結果を狂わせる。そのために精度のよい方向検出ができなくなることを避けるため, 本稿では, これらの受信機の差異に対し補正を行い, 正しく方向検出を行う新たな手法の開発結果について述べる。

1 はじめに

SPS では, 宇宙で太陽光発電により発生した電力をマイクロ波としてビーム制御により正確に地球のレクテナサイトに送信する必要がある。そのためにマイクロ波の送電方向を決定しなければならないが, 静止軌道上という 36000km の高度から地上の直径 2km のレクテナに送電するには $10^{-3} \sim 10^{-4}$ 度のパイロット信号角度検出精度が要求される。この高精度を実現する際に, パイロット信号受信機の性能の個体差は検出角度ずれを引き起こし, 重大な障害となる。個体ごとの性能差の主な原因として, 機器製造時のばらつき, 経年変化, 機器の故障が挙げられ, そのためにパイロット信号が受信機に受信されるとき, 各々の受信機固有のランダムな位相のずれが受信データに加わってしまう。それに対応するために自動較正機能を持つ到来方向検出法の研究を行ってきたが, 従来の MUSIC 法を基にした方向検出法では, 各受信機で引き起こされるデータのずれの平均が 0 とならない (線形近似して 0 とならない) 場合, そのずれの影響で方向検出結果に誤差が出ることがわかってきた。そこで本研究では, そのずれに影響されない方向検出法を開発している。

2 方向検出法解説

2.1 特長と制約条件

通常の方向検出法では, 信号が各受信機を通過する時に生じる位相のずれ (位相誤差) を線形近似した結果, 1 次項の係数が 0 でない場合, 0 からの差分の換算値分だけ方向検出結果に誤差が生じる。それに対し, 本検出法ではその差分を排除するので, 受信機を通した際に, 上記の種類の位相誤差が受信データに加わったとしても正確な方向検出ができる。制約条件としては, 同時刻でなくともよいが 2 種類の角度 ($\theta, \theta + \alpha$) の信号が必要で, なおかつその 2 種類の信号の間の角度 (α) が既知である必要がある。ここで線形近似時に見えてくる 0 からの差分がどのように影響を及ぼすかを説明する。図 1 のように, 受信機 1~5 でパイロット信号を受信することで -, +, +, -, - の位相誤差を持つ受信データが得られるとする。この位相誤差が 0 を中心としてランダムに発生するものと考えて線形近似すると, 受信データのみを頼りにしている計算機側から見ると, 受信機面は角度 γ 分だけ実際とは異なってしまう。これが線形近似時の 1 次項の係数の 0 からの差分の影響で, 受信機面自体を実際の面から誤認しているため方向検出結果も自動的に γ だけずれることになる。本検出法では, 2 種類のデータを用いることで, 位相誤差に含まれる γ を生み出す要素を消去し, 本来の到来方向のみを抽出することができる。

2.2 受信データ処理の流れ

本研究では, 受信データとは, パイロット信号の受信電圧をデジタルサンプリングしたものを受信データとして扱う。実験においては, マイクロストリップラインの円形パッチアンテナをアレイ配置した受信アンテナでパイロット信号を

注1 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

受け、受信処理回路を通過した後の電圧値をデジタルサンプルし記録したものが受信データである。受信データを方向検出アルゴリズムに通す際、次の処理が施される。

データ補間 → オフセット&振幅処理 → 複素数化 → [位相差分析 → 方向検出 → 位相誤差検出]
 ([]内が今回研究した方向検出アルゴリズムである)

「データ補間」は、受信データに直流成分が重畳するのを排除し、またその上で信号の振幅を計算機に認識させるための前処理として必要であり、現在はスプライン補間を用いている。「オフセット&振幅処理」では、補間した受信データの最大電圧と最小電圧を用いて直流成分を除く。それと同時に、各受信機の振幅を求め、データを1に規格化する。この操作により振幅特性が得られる。SPSでは静止軌道上の発電衛星に到達したパイロット信号は、受信機アレイに到達した時点でほぼ平面波とみなすことができ、各受信機への入力電圧が全て同じと考えられる。よって、その入力電圧に違いがあると、それがそのまま各受信機の振幅特性を表すこととなる。「複素数化」では、前2段階の処理後のデータ(単なるsin波)をそのまま実部、90度ずらしたものを虚部とする。方向検出アルゴリズムで処理するデータは複素数の形で位相差の分析を行う。その内容に関する「方向検出アルゴリズム」は次節で述べる。

2.3 方向検出アルゴリズム

M 個の受信機を直線状に並べたリニアアレイを考える。第1受信機のデータを基準とし、これと比較して他の $M-1$ 個の受信機データの位相の違いを分析していく。あるパイロット信号周波数 f における各受信機通過の際に受信データにランダムに加わる位相誤差を

$$\mathbf{B} = [q_1 \quad p + q_2 \quad \cdots \quad p(M-1) + q_M] \quad (q_1 = 0, q_2 + q_3 + \cdots + q_M = 0)$$

とする。第1受信機基準なので、 \mathbf{B} の第1要素は0である。 p は位相誤差を線形近似したときに表れる傾き、 q は線形近似すると相殺される位相誤差のランダムな成分である。

位相差分析

到来角 θ のsin波を受信すると、第 m 受信機では次の位相誤差情報を持つ受信データが作られる。

$$\frac{w_0 d}{c} (m-1) \sin \theta + p(m-1) + q_m \quad (m = 1, 2, \dots, M)$$

受信データの周波数は、ダウンコンバート後の周波数 f_0 である。 w_0 は f_0 の角周波数、 d は受信機の間隔(ここではパイロット信号周波数 f の半波長)、 c は光速である。よって、第1受信機を基準とした相対位相誤差は

$$\mathbf{S} = [0 \quad \beta + p + q_2 \quad 2\beta + 2p + q_3 \quad \cdots \quad (M-1)\beta + p(M-1) + q_M] \quad \left(\beta = \frac{w_0 d}{c} \sin \theta \right)$$

この相対位相誤差の和は

$$\begin{aligned} \sum \mathbf{S} &= \frac{\{1 + (M-1)\}(M-1)}{2} (\beta + p) + (q_2 + \cdots + q_M) \\ &= \frac{M(M-1)}{2} (\beta + p) \end{aligned}$$

$\sum \mathbf{S}$ を $\beta + p$ の係数で割ったものを k とすると

$$k = \beta + p$$

k を用いて \mathbf{S} から $\beta + p$ の成分を除くと

$$\mathbf{S}_k = [0 \quad q_2 \quad q_3 \quad \cdots \quad q_M]$$

この \mathbf{S}_k の要素は、各受信機の受信データの到来角 θ による成分 β と、位相誤差の線形近似時の傾きの成分 p を除いた完全なランダムな位相誤差成分を表す。

方向検出

S から S_k を除くと、 θ の成分と線形近似時の傾きの成分の成分の合成要素が残る。

$$S - S_k = [0 \quad \beta + p \quad 2\beta + 2p \quad \cdots \quad (M-1)\beta + (M-1)p]$$

ここで、各受信機の第1受信機に対する相対位相誤差がいくらランダムであっても、位相誤差の平均が0であれば ($p = 0$)、 $S - S_k$ の成分は β の θ 成分のみとなり、正しい到来角 θ をもとめることができる。また、様々な方向検出法 (MUSIC 法など) を用いて θ 計算することもできる。しかし、実際は完全に平均が0とは限らず $p \neq 0$ となる。その場合、通常の方向検出法では、到来角成分 β と線形近似時の傾きの成分 p が区別されずに混同して処理されてしまい、正しい方向 θ から p の値に応じた分だけずれた検出結果が得られる。

本検出法では、到来角 θ と $\theta + \alpha$ の2種類の角度の受信データを用いて p を除去することで、位相誤差の平均が0という特殊な場合以外の、より一般的なランダム位相誤差が重畳される場合でも θ を求めることができる。

この手法は α が既知であること、2種のデータを取得する際の受信機の位相誤差が一致していることが前提である。ここで大まかな手順を書き下すと、

- (1) 受信データより、上記処理を施し $\sin \theta + k'$, $\sin(\theta + \alpha) + k'$ を求める (k' : 線形近似時の0からの差分成分)
- (2) (1) の差分をとり、 $L = \sin(\theta + \alpha) - \sin \theta$ を求める
- (3) $l_2 - l_1 = \sin \theta_2 - \sin \theta_1$ ($\alpha = \theta_2 - \theta_1$) の θ_1 を一定範囲の角度で走査し、 $L = l_2 - l_1$ となる角度 θ_k を検出する
- (4) (3) で検出された角度 θ_k が、求める角度 θ である

図2にこの処理の概念図を示す。受信データ1種類から方向検出する場合、混同された到来角成分 β から線形近似時の傾きの成分 p を分別することは、受信機の位相誤差が既知でないとできない。そこで到来角成分と線形近似時の傾きの成分の性質の違いを考えると、到来角成分は θ に依存して変化するが、傾き成分は同じ受信機を使い、かつ短時間ならば事故でもない限り変化しない。そのため2種類の受信データの差分をとることで、 θ に依存しない共通項である傾き成分が除ける。また三角関数において、2種の角度の \sin の値の差は -90 度 \sim 90 度では2個しかない。到来角 θ の正負の違いがわかれば差分後の走査の解は一意に決まる。

位相誤差検出

角度 θ がわかれば、S を用いて各受信機に重畳されている位相誤差が求まる。

3 本検出法を用いた計算機シミュレーション

本検出法の動作を確認するためにシミュレーションを行った。設定条件は、次の通りである。

1. 第一受信機の振幅を1に規格化し、その他の受信機の振幅特性は0~2、位相誤差は ± 90 度の間、各受信機にかかる未知のオフセットを0~30でそれぞれランダムに与える。
2. 受信機は半波長間隔 (2GHz) で5素子とする。
3. 衛星の中で持つの高度情報は36000kmとする。
4. 基地局を2箇所設置する。(各基地局からの信号周波数は微妙に異なる)

シミュレーションは、角度 α にずれがないとき (理想状態)、ずれがあるときの2種類を行った。

3.1 2波源間の角度 α にずれがないときのシミュレーション

角度 α をパラメータとして、いろいろな到来角の波のデータを与えて方向検出させた。その結果を図4に示す。縦軸が方向検出角度の誤差、横軸が設定到来方向 θ を表す。 θ は0~9度で変化させている。 $\alpha < 1.5$ 度においては、到来角が大きくなるにつれて方向検出精度が向上する傾向にあることが見て取れる。 $\alpha > 1.5$ 度においては、どのような到来

角でも $10^{-3} \sim 10^{-4}$ 度の精度で方向検出されている。静止軌道上 36000km から見たときの地上の 1km のずれを角度で表すと 0.0016 度に相当するので、この精度であれば SPS での仕様を満足する。

また、受信機の間隔を今回のシミュレーション設定の半波長から更に広げること、及び補間法を改善することで、より精度が向上すると考えられる。

3.2 2 波源間の角度 α にずれがあるときのシミュレーション

地上での衛星位置観測結果から衛星に与えられる α と、実際の衛星位置により決まる α にずれがある場合のシミュレーションを行った。ここでは位置観測結果が高さ方向に 1km ずれたことを想定した。その状況を図 3 に示す。36000km の高度で高さ方向に 1km ずれると α にどれくらいずれが生じるかを 3 通りの α に関して表記する。加えて、 α の角度それぞれにおける地上での基地局間の距離も参考までに記す。

α	地上基地局間距離	高度 36001km	高度 35999km
0.75 度	471.25km	-0.000020830 度	+0.000020831 度
1.5 度	942.7km	-0.000041647 度	+0.000041649 度
3 度	1886.7km	-0.000083180 度	+0.000083184 度

シミュレーション結果を図 5 に示す。縦軸が方向検出角度のずれ、横軸が設定到来方向 θ を表す。まず α が大きくなるにつれて精度が向上することがわかる。ただし、実際に本検出法を搭載することを考えると、地上基地局間距離より α を 3 度より大きく設定することはあまり現実的ではない。また、理想状態のときと同様、到来方向角が大きくなると方向検出精度が上がり、 $\alpha = 3$ 度において、 $10^{-2} \sim 10^{-3}$ 度の精度、最高 10^{-3} 度程度の方向検出精度が出ている。

4 SPS における本検出法の導入案

この検出法を用いるには、静止軌道上にある発電衛星の位置をほぼ正確に捕捉する必要がある。これは、2 種類の到来角の差 α が既知であることが前提となっており、その精度によりこの検出法の精度が左右されるためである。また、3 次元空間で本検出法を導入するには、パイロット信号基地局は 3 箇所必要である。基地局が 2 箇所なら衛星の向きによっては α の値がごく小さくなることが予想されるが、3 箇所あれば α の値が小さくなりすぎないような位置関係にある衛星と基地局を選択して方向検出に用いることができ、 α に誤差がある場合でも精度を保つことができる。2 種類の受信データの取得はごく短時間間に行う。時間差が長くなればそれだけ受信機特性に変化が生じる可能性が高くなる。

5 まとめと課題

本稿では、 \sin の値の差に注目した方向検出法を提案した。そしてシミュレーションにおいて、受信機通過時に、平均が 0 にならない一般的に起こりうるランダムな位相誤差が重畳される時でも、2 波源間の角度設定と実測値にずれがない場合では 10^{-3} 度程度の精度で、実際の衛星位置観測誤差で起こりうる程度のずれがあるときは $10^{-2} \sim 10^{-3}$ 度程度の精度で方向検出ができることを確認した。このことは、静止軌道上からほぼ正確にパイロット信号の発信源の位置を把握することができることを表す。また、SPS での本検出法の導入法も提案した。今後の課題として、シミュレーションだけでなく実験のデータを用いて本検出法の動作を確認すること、スプライン補間よりも目的に適した補間法を検討することが挙げられる。

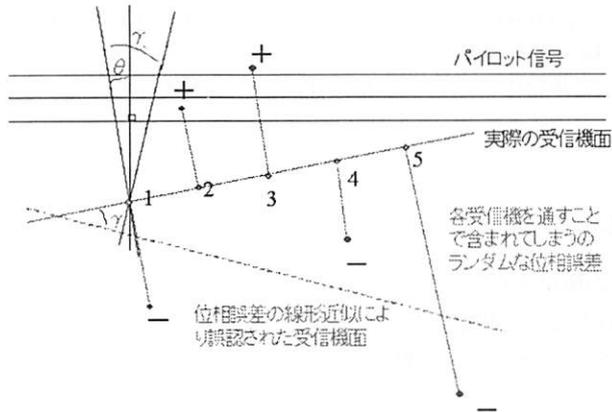


図 1: 位相誤差の線形近似によるずれ

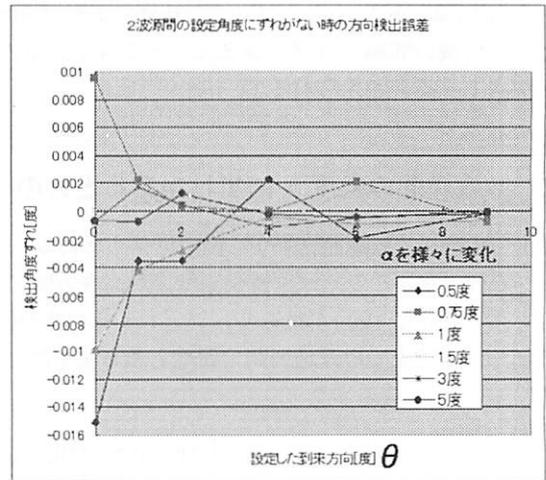


図 4: α にずれがない場合のシミュレーション結果

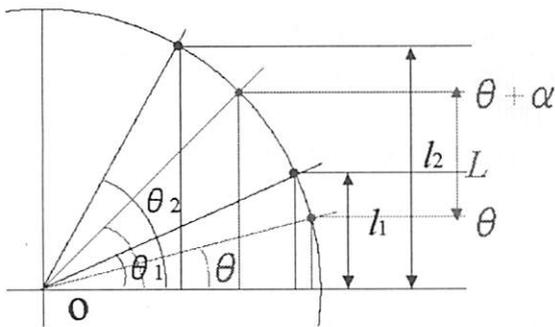


図 2: 方向検出概念図

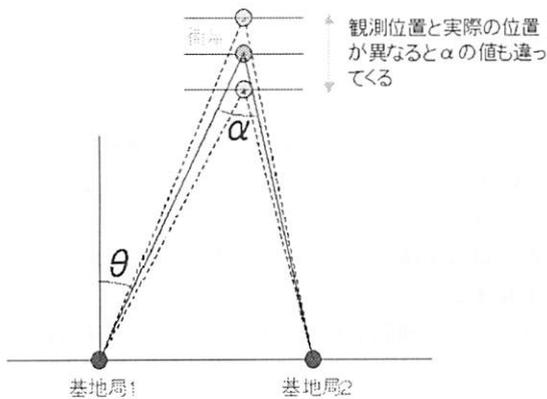


図 3: シミュレーションでの α ずれあり概念図

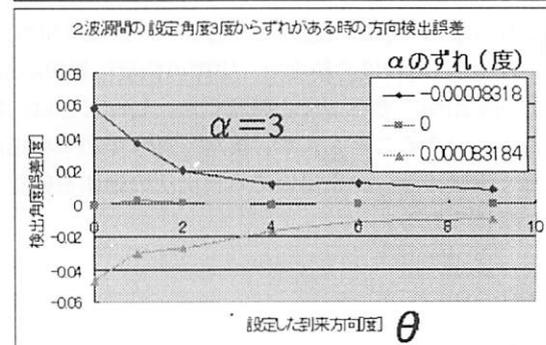
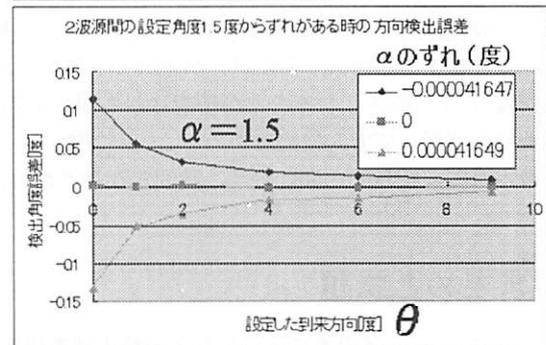
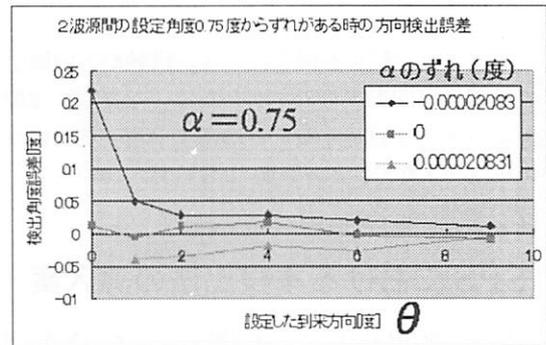


図 5: α にずれがある場合のシミュレーション結果