

## 研 究

## 経緯儀式大口徑アンテナの軸較正

高橋富士信\* 河野 宣之\* 小池 国正\*

(昭和 54 年 9 月 22 日受理)

## 概 要

電波研究所鹿島支所の直径 26 m のパラボラアンテナ (以下 26 m アンテナと呼ぶ) の電気軸と機械軸との較正を天体電波源を用いて行った。観測した電波源は 11 種類であり、実際に較正に使用した電波源は 9 種類である。受信周波数は中心周波数が 4110 MHz であり、帯域幅は 30 MHz である。観測は 1979 年 4 月 25 日から 5 月 3 日まで 9 日間連続観測を行った。その結果、方位角誤差 2.3 mdeg, 仰角誤差 2.7 mdeg の軸較正係数を決定することができた。

また係数決定の際のパラメータ決定法と観測できる電波源が少ない場合の電波源の組合せ方法について検討した。本論文の成果は軸較正観測に十分時間のとれない現用のアンテナについて効果的な観測計画を立てるのに役立つと考えられる。

## 1. はじめに

大口徑アンテナのメインビームの幅は、使用する周波数が高くなるとともに非常に細くなってきている。このためメインビームを正しく目的対象の方に向けるためには、大口徑アンテナの機械的主軸や電気軸のずれがメインビーム方向に対してどのようなずれを引き起こすのかを知る必要がある。このずれの量を測定しアンテナの軸の較正を行うためには位置のよく決まった天体電波源を利用する必要がある。Meeks<sup>(1)</sup> らは Chauvenet<sup>(2)</sup> や Smart<sup>(3)</sup> により開発された光学望遠鏡の指向較正法を電波望遠鏡に応用して 120 フィートの Haystack のアンテナの軸較正を 15.25 GHz の受信周波数で行い、Az 方向で 0.°0029, El 方向で 0.°00345 の精度で軸較正パラメータを決定した。

我が国においても電波研究所鹿島支所の 26 m アンテナの軸の較正が Kawano と Inoue<sup>(4)</sup> によって行われ、Az 方向で 0.°0056, El 方向で 0.°0078 の精度で較正係数を得ている。

アンテナの軸較正にはできるだけ全天における天体電波源の位置の O-C (観測位置と計算位置の差) を知る

のが望ましい。このためには軸較正をするアンテナを長期間にわたりある決まった方法でオフセットをかけながら制御しなければならない。手動でこのオフセット作業を長期間繰り返すのは不可能に近い。したがって軸較正には高精度の計算機コントロールが必要不可欠である。現在鹿島支所には主要な 4 アンテナを計算機制御できるプログラム追尾用計算機が設置されており、これを利用して行った 26 m アンテナ軸の再較正の結果をまとめたものがこの論文である。

ほぼ全天をカバーするように 11 個の赤緯の異なる電波源を選び 1979 年 4 月 25 日から 5 月 3 日まで 9 日間連続観測を行った。その結果 0.°002 rms の精度で軸較正係数を決定することができた。

上記の目的のほかに、軸較正に適した電波星の選択法の調査研究も本観測の目的とした。というのは、宇宙通信等の現用のアンテナでは長期間軸較正観測に使用できないので、少ない電波星の組合せでより高精度の軸較正をすることが重要なためである。

## 2. 軸較正パラメータ

鹿島支所の 26 m アンテナは経緯儀式 ( $Az-El$  タイプ) である。Az 角は真北を 0° とし、東向きに Az 角が増大する。このアンテナのメインビームの半値幅は約 0.°2 である。

Meeks *et al.*<sup>(1)</sup> によれば本アンテナのような経緯儀式マウントの場合の軸ずれ誤差  $\Delta Az$ ,  $\Delta El$  は次式で表される。

$$\Delta Az = +\chi \cdot \sin(Az - \omega) \cdot \tan El + \varepsilon \cdot \tan El + \delta \sec El + \Delta Az_0 \quad \dots(1)$$

$$\Delta El = +\chi \cdot \cos(Az - \omega) + g \cdot El + \Delta El_0 \quad \dots(2)$$

ここで、

$\chi$ : Az 軸の垂直軸からの傾度

$\omega$ : Az 軸の傾いている方向の方位角

$\varepsilon$ : Az, El 両軸の非直交度

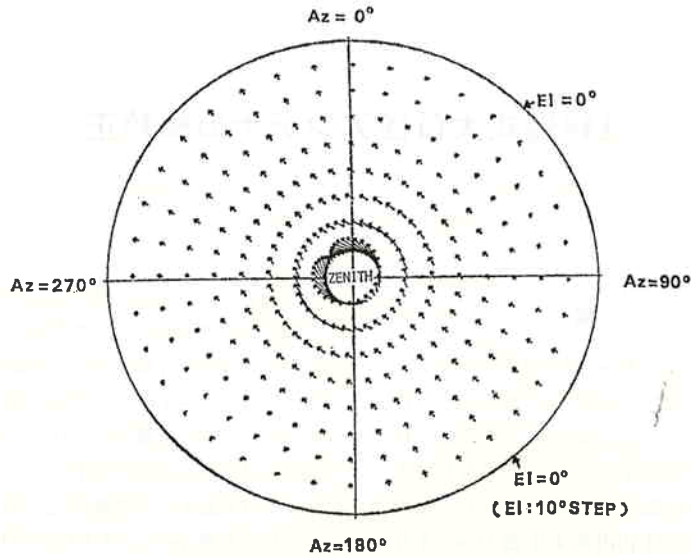
$\delta$ : El 軸とアンテナビーム方向との非直交度

$g$ : 重力たわみによる誤差

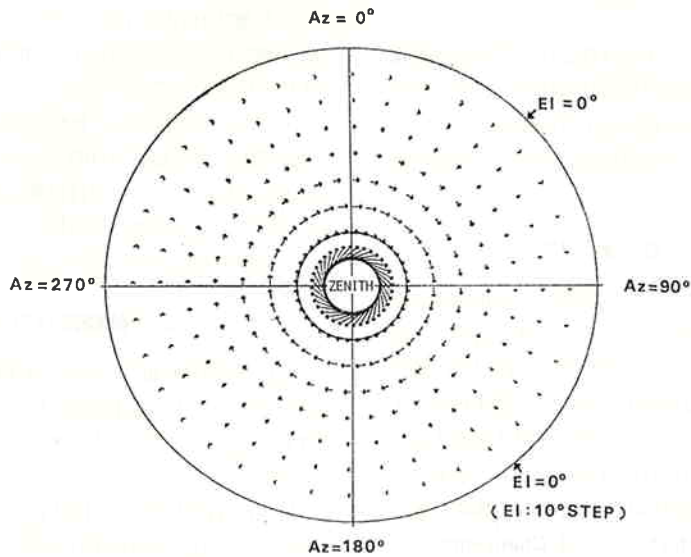
$\Delta Az_0$ : 方位角ゼロセット誤差角度

$\Delta El_0$ : 仰角ゼロセット誤差角度

\* 鹿島支所 第三宇宙通信研究室



第1図 方位角軸の鉛直軸からの倒れによる角度誤差の2次元ベクトルパターン



第2図 方位角・仰角両軸の非直交による角度誤差の2次元ベクトルパターン

第1図から第4図に上記の各パラメータが  $Az \cdot EI$  の誤差にどのように効くのかを示す。円周方向は  $Az$  方向を示し、半径方向が  $EI$  方向を示している。円の中心が  $EI=90^\circ$ 、外周が  $EI=0^\circ$  とする。また  $EI$  方向はリニアスケールである。つまり地平座標を一種の2次元極座標に表したものである。この座標系の中のベクトルはその始点がアンテナの方向の  $Az, EI$  を示し、ベクトルの方向と大きさはその  $Az, EI$  点におけるアンテナの軸ずれ誤差の方向とその量を示している。

第1図は  $\chi$  と  $\omega$  の効果である。この図では  $\omega=135^\circ$

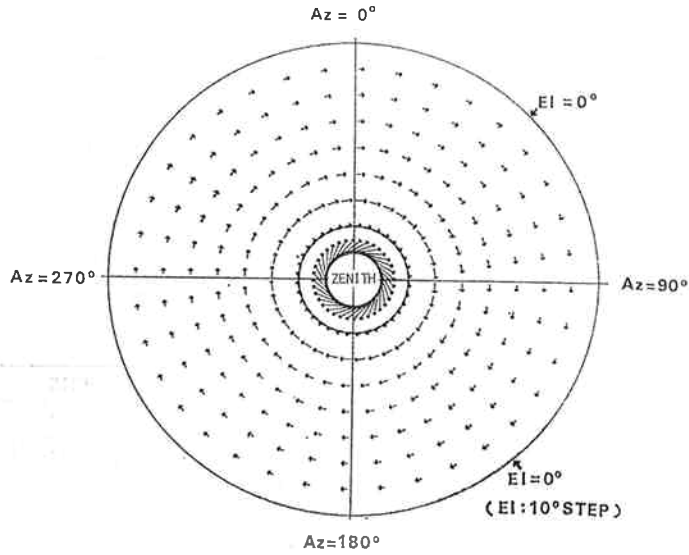
としており、 $Az=135^\circ$  から  $315^\circ$  の方向の誤差ベクトルが顕著である。このパターンは  $Az$  軸の垂直軸からの倒れによるものであるが、 $Az$  軸が  $Az=315^\circ$  の方向に倒れていることをこのベクトルパターンは明示している。

以下の処理では  $\chi, \omega$  について次の関係をもつ  $\xi, \eta$  に変換している。

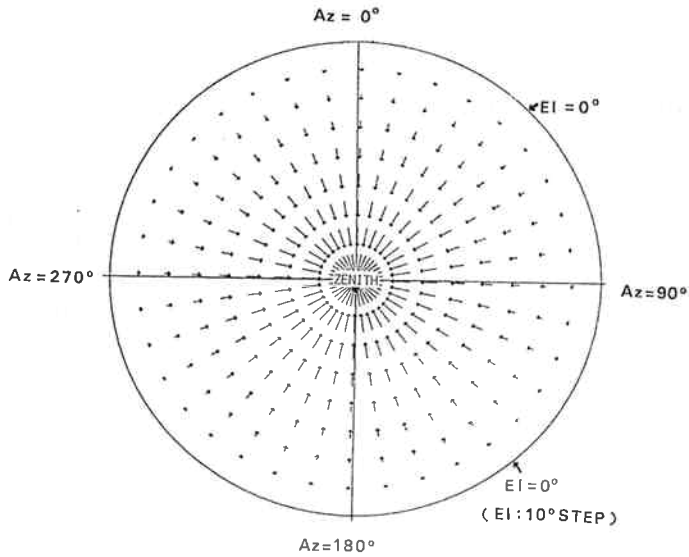
$$\xi = \chi \cos \omega, \quad \eta = \chi \sin \omega \quad \dots\dots(3)$$

$\xi, \eta$  を用いれば、第(1), (2)式は線型化できるので推定理論の適用が容易になる。

第(1), (2)式の中ではこの  $\xi, \eta$  の項だけが方位角に依



第3図 コリメーション誤差による角度誤差の2次元ベクトルパターン



第4図 重力たわみによる誤差による角度誤差の2次元ベクトルパターン

存する。その他の項は仰角のみの関数であり、中心対称なベクトルパターンとなる。

第2, 3, 4図にそれぞれ  $\epsilon$ ,  $\delta$ ,  $g$  の項の誤差ベクトルに対する効果を示した。 $\epsilon$ ,  $\delta$ ,  $g$  の三者は共に正の値を持つとした。まず第2図は中心対称で  $\Delta EI = 0$  の円周方向のベクトルパターンとなっている。仰角の小さいところでゼロとなっている。第3図は第2図と同様の周回ベクトル場であるが、仰角の小さいところもゼロにはならない。

第4図は  $g$  の効果を示す。この項は求心ないしは離心

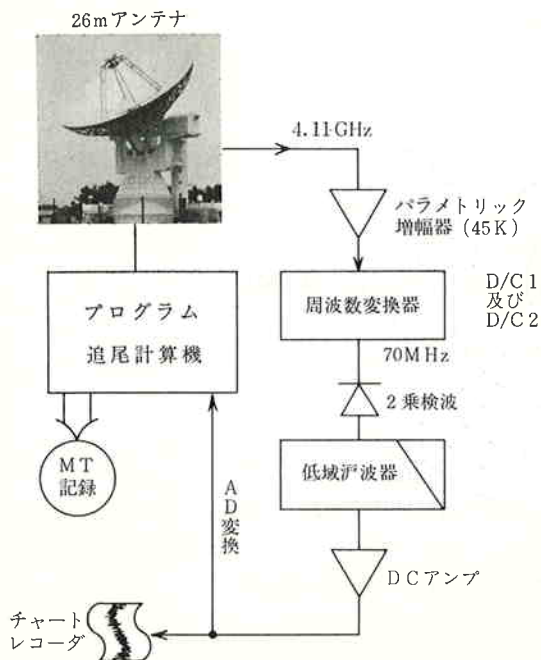
ベクトルパターンとなる。

以上のほかに  $\Delta Az_0$ ,  $\Delta EI_0$  の一定オフセット量によるベクトルパターンが考えられる。

軸較正におけるパラメータの決定とは、観測によって得られた2次元ベクトル場から第1~4図の各成分を分離することである。

### 3. 観測システム

観測システムは電波星の受信部と電波星の高精度プログラム追尾部分からなる。受信部の構成を第5図に示

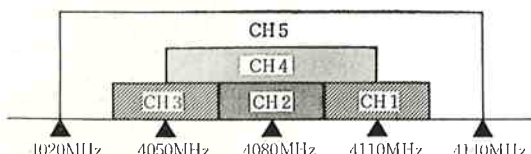


第5図 26mアンテナの軸校正の観測システムブロック図

す。アンテナで受信した4GHz帯(帯域30MHz)の雑音は45Kの雑音温度のパラメトリックアンプにより60dB増幅される。次段の周波数変換器(D/C1)により1.7GHzの中間周波に変換されてアンテナ塔上の受信機室より地上の実験庁舎へ伝送される。D/C2により70MHzの第2中間周波に変換された後、自乗検波器と時定数3秒の低域濾波器を通してDCになる。DCアンプ

第1表 26mアンテナのラジオメータ受信機の中心周波数と帯域幅

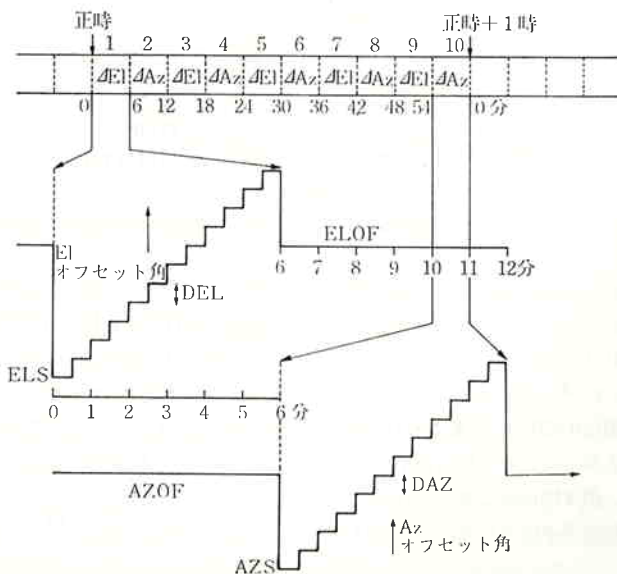
ch 数	中心周波数	帯域幅
ch 1	4110 MHz	30 MHz
ch 2	4080 MHz	30 MHz
ch 3	4050 MHz	30 MHz
ch 4	4080 MHz	60 MHz
ch 5	4080 MHz	120 MHz



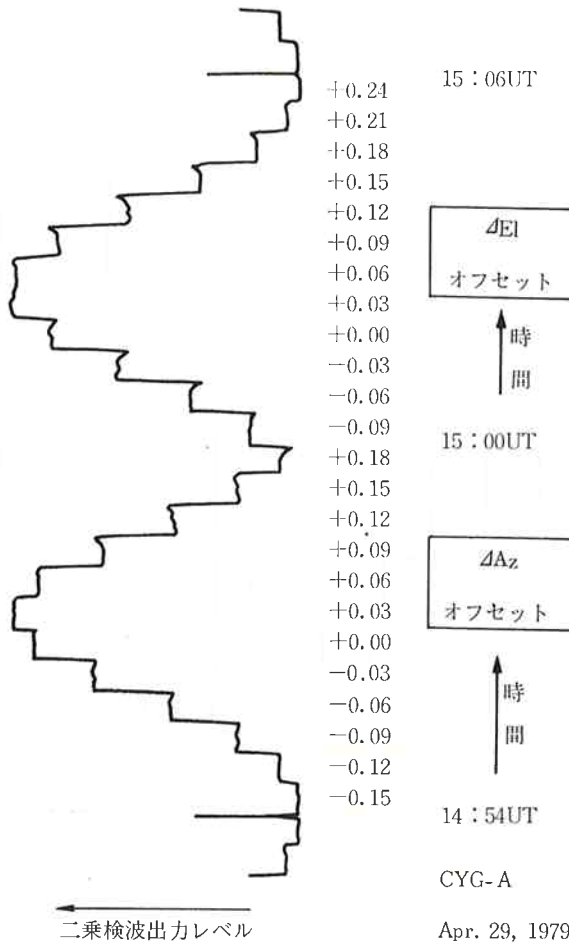
第6図 26mアンテナのラジオメータ受信機の帯域構成

で増幅されてチャートレコーダ上に記録されるとともにプログラム追尾用NEAC 3200により1秒ごとにサンプルされ磁気テープに記録される。なおD/C2は受信周波数と帯域を、第1表及び第6図に示す5種類の中から選ぶことができる。これは電電公社のマイクロ回線の混信を避けて観測するのに役立った。

オフセットシーケンス及びオフセット角の変化は第7図に示すとおりである。1時間を5分割し、各分割ごとに仰角・方位角それぞれ1回の測定を行う。1分割12分間で6分間ごとにEI方向オフセットとAz方向オフセットを行う。EI方向オフセットの場合にはAzは指



第7図 軸校正測定用バックグラウンドオフセットの時間的变化



第8図 実際の観測例 (CYG-A)

定した一定値をとり、 $EI$  はオフセット量が変化し、 $Az$  方向オフセットの場合には  $EI$  が一定値をとり、 $Az$  はオフセット量が変化する。オフセット角度の変化は第7図に示すとおりである。このオフセットプログラムは次の六つのパラメータを自由に設定できる (各パラメータの定義は第7図参照)。

- (i)(ii) AZS, ELS; オフセットスタート角
- (iii)(iv) DAZ, DEL; オフセットステップ角
- (v)(vi) AZOF, ELOF; オフセットパイアス角

第8図に (i) AZS =  $-0.15$ , (ii) ELS =  $-0.09$ , (iii) (iv) DAZ = DEL =  $0.03$ , (v) AZOF =  $0.04$ , (vi) ELOF =  $0.05$  とした観測例を示す。実際の観測中は、これらの値を観測対象とアンテナ方向によりダイナミックレンジが大きくなるように決めた。観測対象は Cyg A (第2表参照) である。ただし  $Az$  方向のオフセットは常に  $\sec(EI)$  で正規化している。したがって仰角の変化によるドリフトカーブの時間軸の伸縮はない。

第2表 使用した天体電波源の赤経・赤緯 (1950.0)

電 波 源	赤経 (1950.0)	赤緯 (1950.0)
1. 3C274	12 <sup>h</sup> 28 <sup>m</sup> 17 <sup>s</sup>	12° 39' 49"
2. オメガ星雲	18 <sup>h</sup> 17 <sup>m</sup> 33 <sup>s</sup>	-16° 12' 06"
3. 3C-84	03 <sup>h</sup> 16 <sup>m</sup> 30 <sup>s</sup>	41° 19' 52"
4. Cas A	23 <sup>h</sup> 21 <sup>m</sup> 13 <sup>s</sup>	58° 32' 45"
5. 3C-345	16 <sup>h</sup> 41 <sup>m</sup> 18 <sup>s</sup>	39° 54' 11"
6. 3C-380	18 <sup>h</sup> 28 <sup>m</sup> 13 <sup>s</sup>	18° 42' 44"
7. Tau A	05 <sup>h</sup> 31 <sup>m</sup> 30 <sup>s</sup>	21° 59' 02"
8. Cyg A	19 <sup>h</sup> 57 <sup>m</sup> 44 <sup>s</sup>	40° 35' 49"
9. Ori A	05 <sup>h</sup> 32 <sup>m</sup> 49 <sup>s</sup>	-5° 25' 16"
10. W51	19 <sup>h</sup> 21 <sup>m</sup> 24 <sup>s</sup>	14° 24' 33"
11. 3C273B	12 <sup>h</sup> 26 <sup>m</sup> 33 <sup>s</sup>	02° 19' 42"

#### 4. 観測対象

観測した電波星は第2表に示す11種である。観測対象としては点電波源の方が良いが、強度の点で広がった電波源には劣る。受信周波数が4GHz帯であり電電公社のマイクロ回線との干渉が起こりやすいため、強度のある電波源を使用する時間が多くなった。第2表の中で3C-345, 3C-380は観測はできたが、データはほとんど使用できなかった。

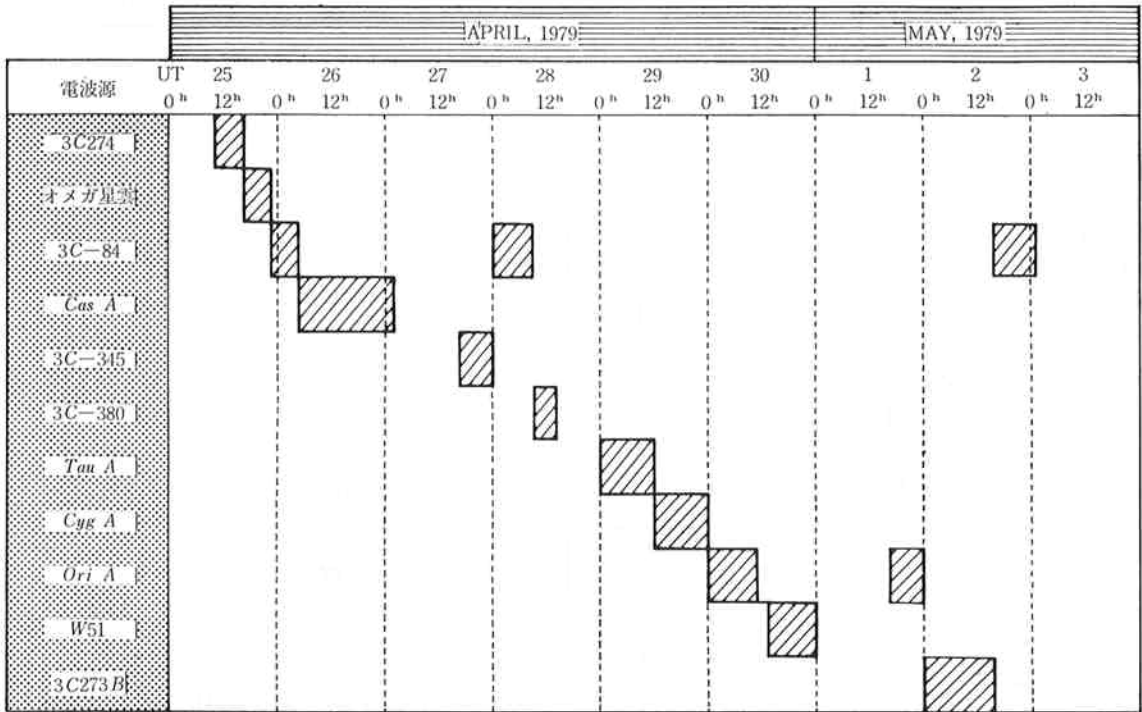
第2表では赤経・赤緯ともに有効数字を6桁としたが、今回の観測の精度 (約5.5桁) から判断して十分な電波星の位置精度であった。

第9図に今回の観測のスケジュールを示す。約9日間の観測期間中、プログラム追尾は自動的に行われた。記録磁気テープの交換とTTY上へのロギングの目視検査に人手を要したのみである。

#### 5. データ処理

データ処理は次の3段階に分けられる。第1段階ではプログラム追尾計算機により、1秒ごとにAD変換されたデータが、サンプル時刻、追尾天体、アンテナ角度、偏波角度等と共に磁気テープに記録される。

第2段階では、磁気テープ中の直列的な時系列データを  $Az, EI$  それぞれ6分間ごとつまり360サンプルデータごとにブロック化する。そのブロックを30秒ごとの12ステップに分解し、各ステップ境界の遷移領域5秒間分のデータを除去した。したがって各ステップのデータ数は25個となる。各ステップにおけるデータの平均値と標準偏差  $\sigma$  を計算し、 $3\sigma$  以上平均値から離れたデータは捨てて再度平均をとり、これをそのステップに



第9図 26m アンテナ軸校正における天体電波源の観測スケジュール

における受信レベルとした。

こうして得られた1ブロック当たり12点のデータに対して最小自乗法により最適のガウスの誤差関数を推定する。なぜなら、これらの12点はいわゆるドリフトカーブ上に散らばっておりドリフトカーブはガウスの誤差関数で近似できるからである。

推定する誤差関数は次の式で表す。

$$y = a \exp\left\{-\frac{(x-p)^2}{\sigma^2}\right\} \quad \dots(4)$$

ここで  $x$  を各ステップにおけるオフセット角とし、 $y$  をオフセット角  $x$  に対する誤差関数の値として、(4)式の振幅  $a$ 、中心位置  $p$ 、分散  $\sigma^2$  を推定すればよい。

(4)式に最小自乗法を適用するために両辺の対数をとって線型化する。つまり

$$\begin{aligned} D = \ln y &= \ln a - \frac{(x-p)^2}{\sigma^2} \\ &= \ln a - \frac{1}{\sigma^2} x^2 + \frac{2p}{\sigma^2} x - \frac{p^2}{\sigma^2} \\ D &= A + Bx + Cx^2 \end{aligned} \quad \dots(5)$$

ここで

$$\begin{aligned} A &= \ln a - \frac{p^2}{\sigma^2} \\ B &= \frac{2p}{\sigma^2} \end{aligned}$$

$$C = -\frac{1}{\sigma^2} \quad \dots(6)$$

最小自乗法によれば、この  $A, B, C$  は次の連立方程式を解くことにより求めることができる。

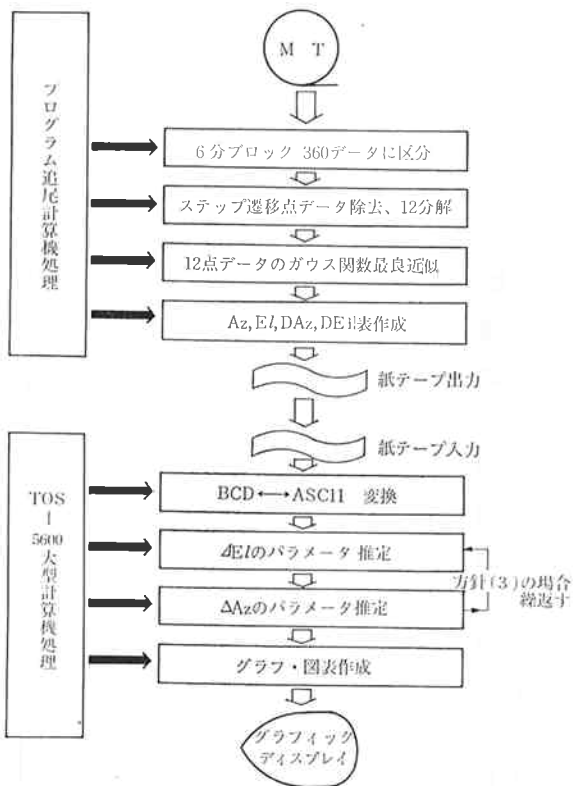
$$\begin{pmatrix} N, & \sum x_i, & \sum x_i^2 \\ \sum x_i, & \sum x_i^2, & \sum x_i^3 \\ \sum x_i^2, & \sum x_i^3, & \sum x_i^4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A \\ B \\ C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum \ln y_i \\ \sum x_i \ln y_i \\ \sum x_i^2 \ln y_i \end{pmatrix} \quad \dots(7)$$

ここで  $N=12$  であり、 $\sum$  は  $\sum_{i=1}^N$  を示す。また  $x_i$  はステップ  $i$  におけるオフセット角であり、 $y_i$  はそのステップの受信レベルである。この方程式を解いて得られた  $B$  と  $C$  により中心位置  $p$  を決めることができる。これが誤差角度である。

第3段階は各ブロックごとに得られた誤差角度から、アンテナ軸校正パラメータを推定するのが主目的であり、次節において述べる。第10図にデータ処理の流れ図を示す。

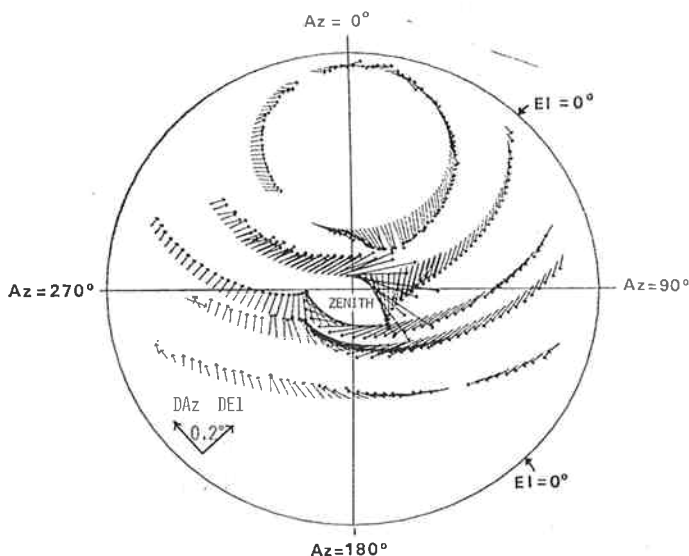
### 6. パラメータ推定法の検討

第11図が前節の方法で求めた誤差角度の極座標ベクトル表現である。それぞれの電波源の天球上の軌道に沿ってベクトルの方向がその点のアンテナ軸角度のずれの方向を示している。これらのベクトルは天球上の大部分をカバーしている。赤緯の低いところのデータが足りな



第10図 26m アンテナ軸校正におけるデータ処理

いので、第2表のオメガ星雲（赤緯 $-16^\circ$ ）を観測したが、良いデータが得られなかった。この原因はオメガ星雲が26mアンテナのメインビームの半値幅（約 $0.2^\circ$ ）に比較して無視できない大きさの構造をもつためと考え



第11図 観測により得られた誤差角度データの2次元ベクトルパターン

られる。

第11図のデータから第(1), (2), (3)式の七つのパラメータを推定する方法として次の四つを検討した。

(1)  $\Delta Az$ ,  $\Delta EI$  両者について全く独立にパラメータを推定する。したがって  $\xi$ ,  $\eta$  のパラメータ重複は無視する。

$\Delta Az$  データ →  $\xi, \eta, \epsilon, \delta, \Delta Az_0$  の推定  
 $\Delta EI$  データ →  $\xi, \eta, g, \Delta EI_0$  の推定

(2)  $\Delta EI$  の四つのパラメータを推定し、その結果得られた  $\xi, \eta$  を  $\Delta Az$  の推定に利用して残りのパラメータを決める。

$\Delta EI$  データ →  $\xi, \eta, g, \Delta EI_0$  の推定  
 ↓ 利用  
 $\Delta Az$  データ →  $\epsilon, \delta, \Delta Az_0$  の推定

(3)  $\Delta EI$  のデータから  $\xi, \eta, g, \Delta EI_0$  を推定し、その結果得られた  $\xi$  を  $\Delta Az$  のデータの推定に用いて  $\eta, \epsilon, \delta, \Delta Az_0$  を決定し、その結果得られた  $\eta$  を用いて、 $\Delta EI$  のデータから  $\xi, g, \Delta EI_0$  の推定をする。これをパラメータが収束するまで繰り返す。

$\Delta EI$  データ →  $\xi, \eta, g, \Delta EI_0$  の推定  
 ↓ (利用)  
 $\Delta Az$  データ →  $\eta, \epsilon, \delta, \Delta Az_0$  の推定  
 ↓ (利用)  
 $\Delta EI$  データ →  $\xi, \eta, g, \Delta EI_0$  の推定  
 ↓ (利用)  
 $\Delta Az$  データ →  $\eta, \epsilon, \delta, \Delta Az_0$  の推定  
 ↓  
 収束するまで繰り返す

第3表 強い電波源の組合せ別軸校正誤差

組合せ	Cas A	Tau A	Cyg A	Ori A	方法	タイプ	$\sigma_{Az}^{diag}$	$\sigma_{\Delta}^{diag}$	備考
(1)					(2)	I	13.9	44.9	
(2)					(3)		$\infty$	$\infty$	
(3)					(2)	II	421.9	6.2	第15図
(4)					(3)		20.8	13.6	第16図
(5)					(2)	I	4.1	3.7	
(6)					(3)		9.0	7.7	
(7)					(2)	I	7.1	15.0	
(8)					(3)		20.0	10.6	
(9)					(2)	I	3.6	4.8	
(10)					(3)		11.0	7.8	
(11)					(2)	II	155.6	6.1	第17図
(12)					(3)		10.7	8.2	第18図
(13)					(2)	I	2.8	3.5	
(14)					(3)		9.4	7.4	
(15)					(2)	I	145.0	60.0	
(16)					(3)		$\infty$	$\infty$	
(17)					(2)	I	3.2	3.7	
(18)					(3)		17.7	8.1	
(19)					(2)	II	152.5	4.4	
(20)					(3)		15.0	11.5	
(21)					(2)	I	3.0	3.0	第19図
(22)					(3)		7.4	7.6	第20図
(23)					(2)	I	3.5	4.6	
(24)					(3)		8.6	7.5	
(25)					(2)	I	2.7	2.9	
(26)					(3)		8.3	7.3	
(27)					(2)	II	84.8	3.7	
(28)					(3)		8.6	7.5	
(29)					(2)	I	2.3	2.7	第21図
(30)					(3)		8.3	7.3	第22図
(31)					(2)		2.2	2.5	

第4表 軸校正用 TOSBAC-5600 データベースのオフセットデータ内容 (APR. 26, 1979 Cas-A)

ラインナンバ	通日	時	分	Az	EI	$\Delta Az$	$\Delta EI$
1170	116	4	21	320.226	40.833	0.045	0.043
1180	116	4	33	320.421	39.279	0.041	0.042
1190	116	4	45	320.693	37.732	0.039	0.040
1200	116	4	57	321.042	36.197	0.040	0.038
1210	116	5	9	321.459	34.674	0.041	0.038
1220	116	5	21	321.946	33.166	0.040	0.033
1230	116	5	33	322.492	31.676	0.041	0.032
1240	116	5	45	323.099	30.205	0.040	0.031
1250	116	5	57	323.761	28.755	0.040	0.028
1260	116	6	9	324.481	27.332	0.040	0.026
1270	116	6	21	325.252	25.933	0.040	0.023
1280	116	6	33	326.071	24.562	0.040	0.024
1290	116	6	45	326.944	23.220	0.040	0.017
1300	116	6	57	327.862	21.910	0.042	0.013
1310	116	7	9	328.823	20.636	0.040	0.013
1320	116	7	21	329.828	19.396	0.038	0.016

(4)  $\Sigma^2 = (\Delta Az)^2 + (\Delta EI)^2$  について微分修正により推定。

(1)の方法は  $\xi, \eta$  の重複を許している点で合理性がないし、2種の方法で求めた  $\xi, \eta$  から、最適の  $\xi, \eta$  を求めるのが困難である。また(4)の方法は第(1)~(3)式の線型関係を非線型化する点で不合理であると考えられるので、(2)と(3)の方法で最小自乗法を用いて推定した。

主要な電波源の軸校正基準としての適性を調べるために Cas-A, Tau-A, Cyg-A, Ori-A 及びその他の電波源の代表的な 16 種の組合せについて、方法(2)と(3)の両方の手法で推定を試みた。その結果を整理したものが第

3表である。組合せ 1 から 30 までの中で奇数番は方法(2)によるもの、偶数番は方法(3)によるものである。また第3表の中でタイプの項の I は、方法(2)が(3)よりも良い推定ができる組合せを示し、タイプの II はその逆の組合せを示している。最下段の組合せ 31 は上述の 4 電波源のほかに 3C274, 3C84 を併用した例を示す。

### 7. パラメータ推定の具体的方法

軸校正用データベースの構成は第4表のとおりである。各電波源ごとに観測日時分、アンテナ角度、誤差角度のデータがファイルされている。これらのデータを用いて次のように推定を行う。

[方法(2)の場合]

第(1)~(3)式を次のように変数を整理する。最初に  $\Delta EI$  について

$$\Delta EI = \xi \cos Az + \eta \sin Az + g \cdot EI + \Delta EI_0 \dots (2)'$$

$$= \xi \cdot F + \eta \cdot G + g \cdot E + \Delta EI_0 \dots (8)$$

ここで  $F = \cos Az, G = \sin Az, E = EI$  である。この線型方程式(8)式に対してファイル内の情報を利用して最小自乗法により次の連立方程式を得る。



$$\begin{pmatrix} \sum F_i^2 & \sum F_i G_i & \sum F_i E_i & \sum F_i \\ \sum F_i G_i & \sum G_i^2 & \sum G_i E_i & \sum G_i \\ \sum F_i E_i & \sum G_i E_i & \sum E_i^2 & \sum E_i \\ \sum F_i & \sum G_i & \sum E_i & N \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \xi \\ \eta \\ g \\ \Delta EL_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum F_i \cdot \Delta EL_i \\ \sum G_i \cdot \Delta EL_i \\ \sum E_i \cdot \Delta EL_i \\ \sum \Delta EL_i \end{pmatrix} \quad \dots\dots(9)$$

ここで  $N$  は最小自乗の処理データ数であり、第3表の組合せによって決まる値である。 $\sum$ は  $\sum_{i=1}^N$  を意味している。また、 $F_i, G_i, E_i, \Delta EL_i$  はファイルのデータにより計算する。

次に  $\Delta Az$  の推定を行う。

$$\Delta Az = \xi \sin Az \tan El - \eta \cos Az \tan El + \epsilon \tan El + \delta \sec El + \Delta Az_0 \quad \dots\dots(10')$$

について、 $\xi$  と  $\eta$  は(9)式から求まっているとして次のように変数を整理する。

$$\Delta Az = M + \epsilon \cdot C + \delta \cdot D + \Delta Az_0 \quad \dots\dots(10)$$

ここで  $C = \tan El, D = \sec El$  であり  $M$  は次式で与えられる。

$$M = (\xi \sin Az - \eta \cos Az) \tan El \quad \dots\dots(11)$$

(10)式ではパラメータは  $\epsilon, \delta, \Delta Az_0$  の3個であり次の連立方程式により決定することができる。

$$\begin{pmatrix} \sum C_i^2 & \sum C_i \cdot D_i & \sum C_i \\ \sum C_i \cdot D_i & \sum D_i^2 & \sum D_i \\ \sum C_i & \sum D_i & N \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \epsilon \\ \delta \\ \Delta Az_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum S_i C_i \\ \sum S_i D_i \\ \sum S_i \end{pmatrix} \quad \dots\dots(12)$$

ここで  $N$  はデータの個数、 $\sum$  は  $\sum_{i=1}^N$  を意味する。

また  $S_i = \Delta Az_i - M_i$  である。

[方法(3)の場合]

第(9)式で最初に4個のパラメータを決めるまでは方針(2)と同じであるが、次の  $\Delta Az$  の推定において  $\xi$  だけを利用するので次の連立方程式となる。

$$\begin{pmatrix} \sum B_i^2 & \sum B_i C_i & \sum B_i D_i & \sum B_i \\ \sum B_i C_i & \sum C_i^2 & \sum C_i D_i & \sum C_i \\ \sum B_i D_i & \sum C_i D_i & \sum D_i^2 & \sum D_i \\ \sum B_i & \sum C_i & \sum D_i & N \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \eta \\ \epsilon \\ \delta \\ \Delta Az_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum S_i' B_i \\ \sum S_i' C_i \\ \sum S_i' D_i \\ \sum S_i' \end{pmatrix} \quad \dots\dots(13)$$

ここで

$$B_i = -\cos Az_i \cdot \tan El_i \quad \dots\dots(14)$$

$$S_i' = \Delta Az_i - \xi \sin Az_i \tan El_i \quad \dots\dots(15)$$

である。この結果得られた  $\eta$  を利用して次の連立方程式を解く。

$$\begin{pmatrix} \sum F_i^2 & \sum F_i E_i & \sum F_i \\ \sum E_i F_i & \sum E_i^2 & \sum E_i \\ \sum F_i & \sum E_i & N \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \xi \\ g \\ \Delta EL_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum S_i'' F_i \\ \sum S_i'' E_i \\ \sum S_i'' \end{pmatrix} \quad \dots\dots(16)$$

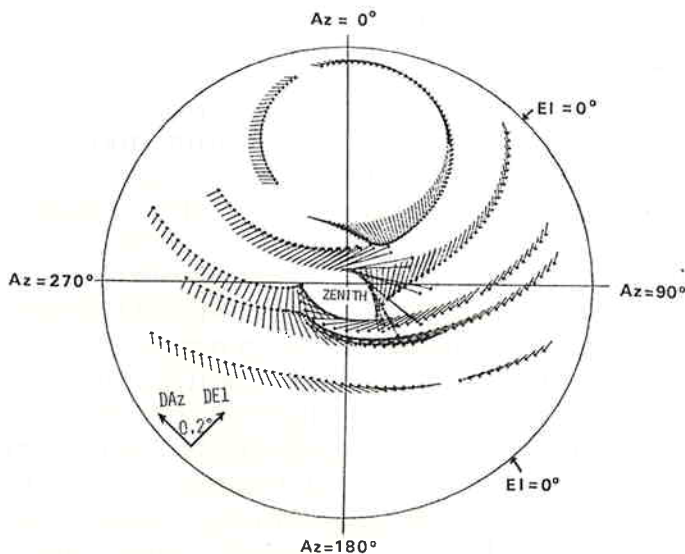
ここで  $F_i, E_i$  は(8)式と同じ省略である。また

$$S_i'' = \Delta EL_i - \eta \sin Az_i \quad \dots\dots(17)$$

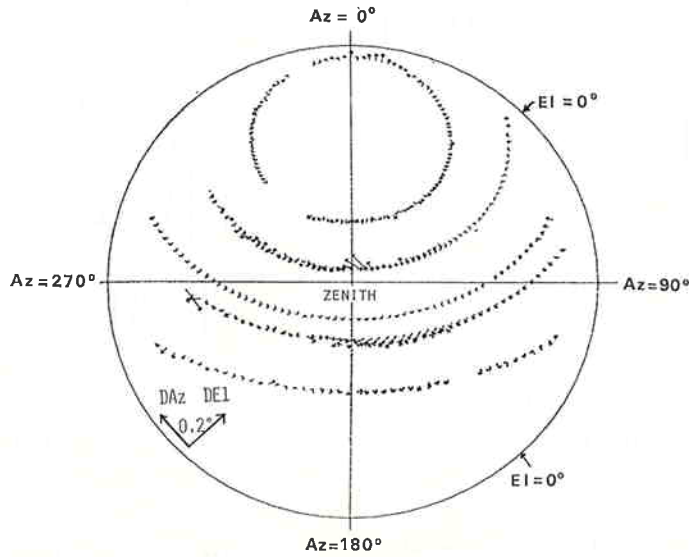
である。こうして得た  $\xi$  を再び(13)式を解くのに用いて収束するまで繰り返すことになる。

### 8. 解析結果

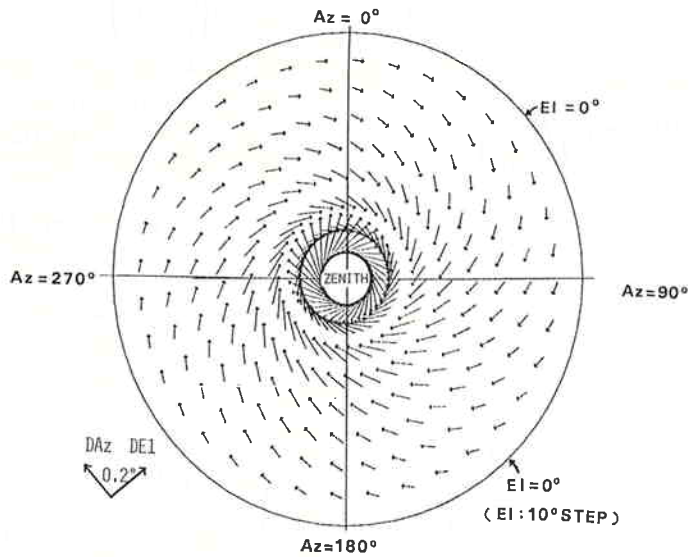
第3表に各組合せによる軸校正パラメータの推定誤差  $\sigma_{Az}(\text{mdeg}), \sigma_{El}(\text{mdeg})$  を示した。この表からは組合



第12図 組合せ(29)のパラメータにより得られた推定2次元ベクトルパターン



第13図 第11図のデータと第12図のデータの差ベクトルパターン



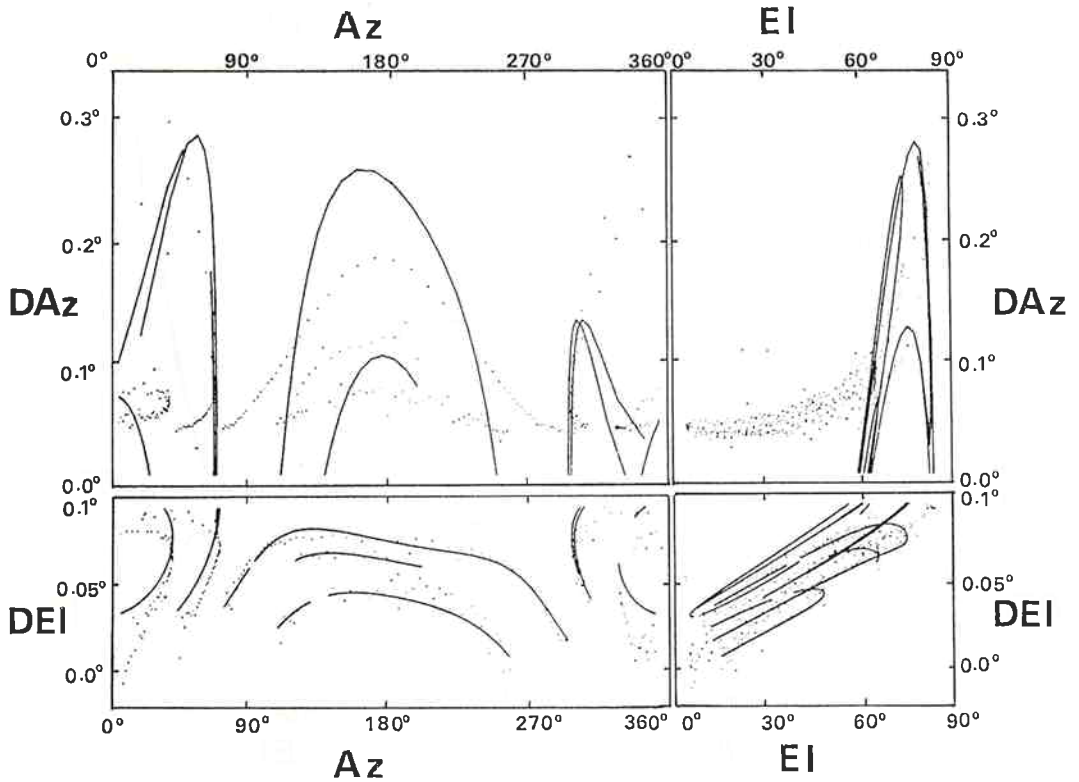
第14図 組合せ(29)による2次元誤差ベクトルパターン (EI: 10° ステップ)

せ(1)が最良であり、(2)が次に良いことがわかる。

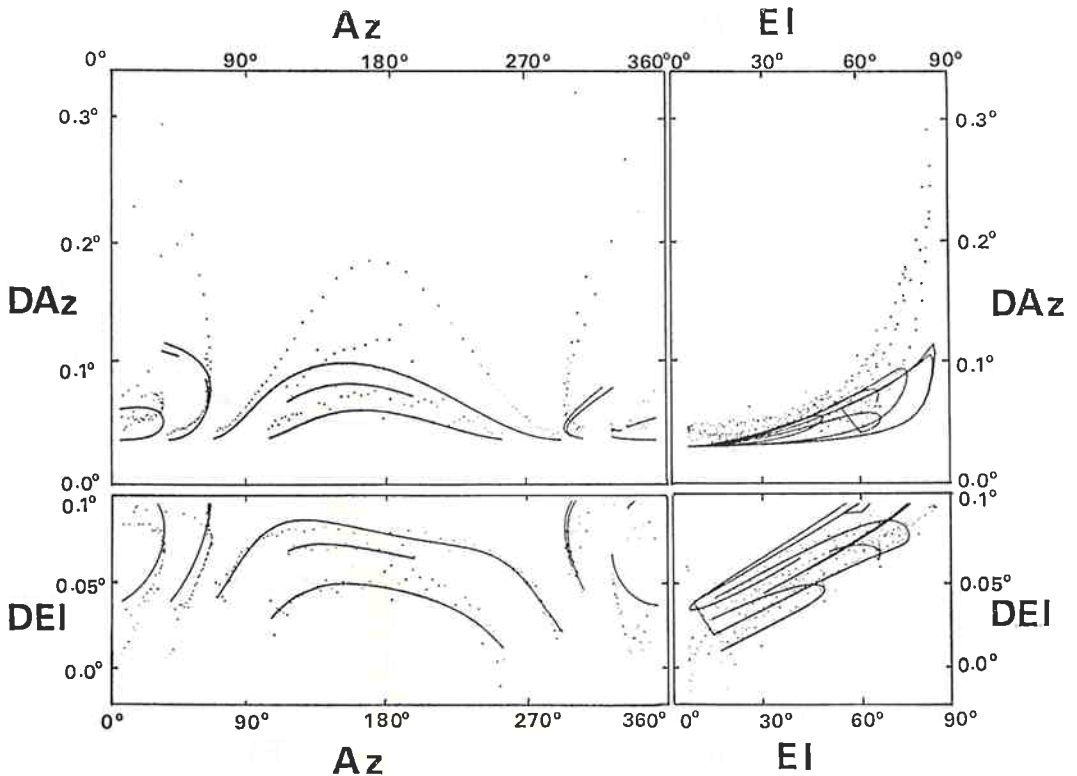
以下の議論ではアンテナの特性測定にひんぱんに使用される星の組合せ(29)の場合の値を26 m アンテナの軸校正パラメータとして使用する。各パラメータは次の値である。(ω 以外の単位は mdeg)

$$\left. \begin{aligned} \xi &= 1.5, \quad \eta = -8.3, \quad \epsilon = 50.6, \\ \delta &= -37.8 \\ (\chi &= 10.55, \quad \omega = 280.^\circ 2) \\ \Delta Az_0 &= -19.1, \quad g = -0.51 \\ \Delta EI_0 &= -3.9 \end{aligned} \right\} \dots (18)$$

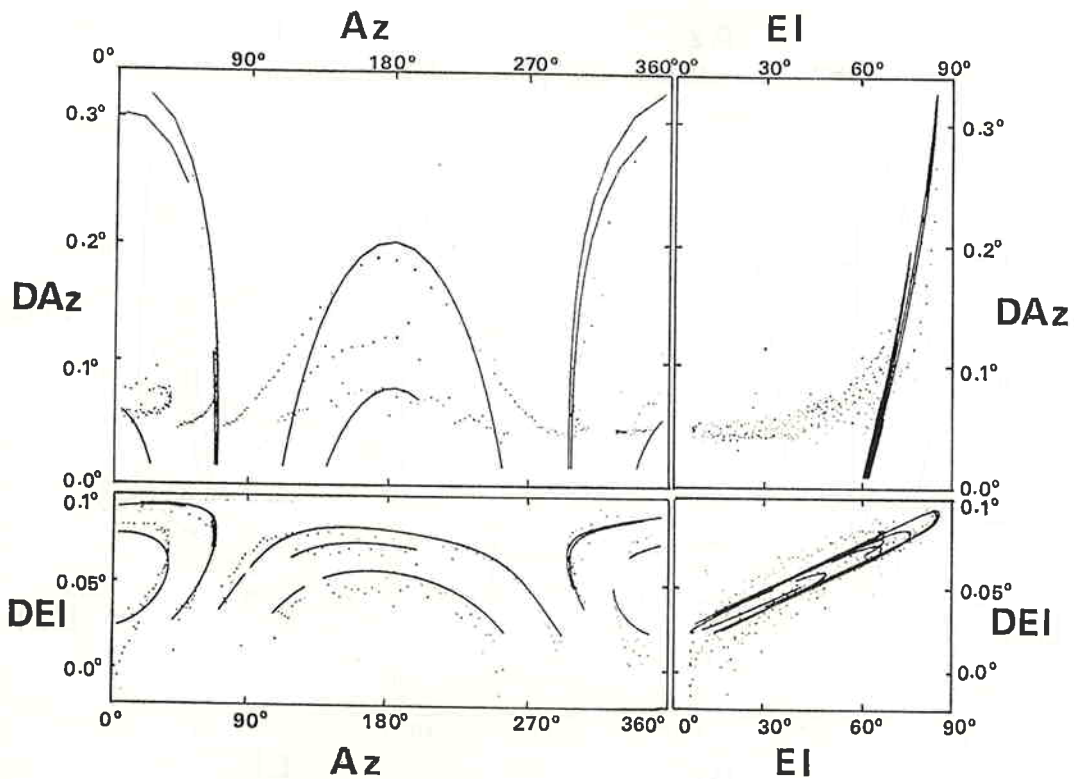
この値を用いて各電波源について第11図と同じ位置について第(1), (2)式を用いて計算したものが第12図である。第11図の測定値とほとんど一致していることがわかる。第11図と第12図の差をベクトル表示すると第13図のようになる。有効桁数より小さな誤差の部分が大部分であるが、Cyg-A, 3C-274で南中時に0.°03~0.°1の誤差がある。しかし、方位角方向の角距離は方位角の差に、仰角の余弦を掛けたものであることを考慮すれば実用上南中時の高仰角時での不具合はないと考えられる。



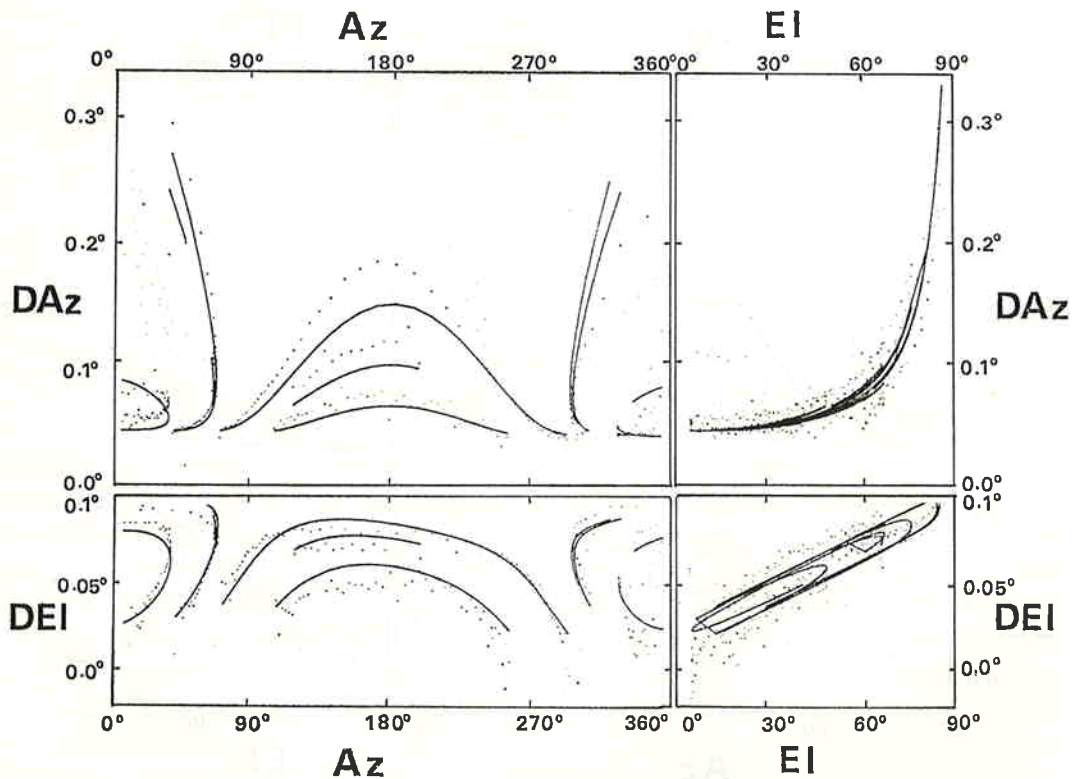
第15図 方法(2)に従って Tau A のみのデータからの推定結果 (組合せ(3))



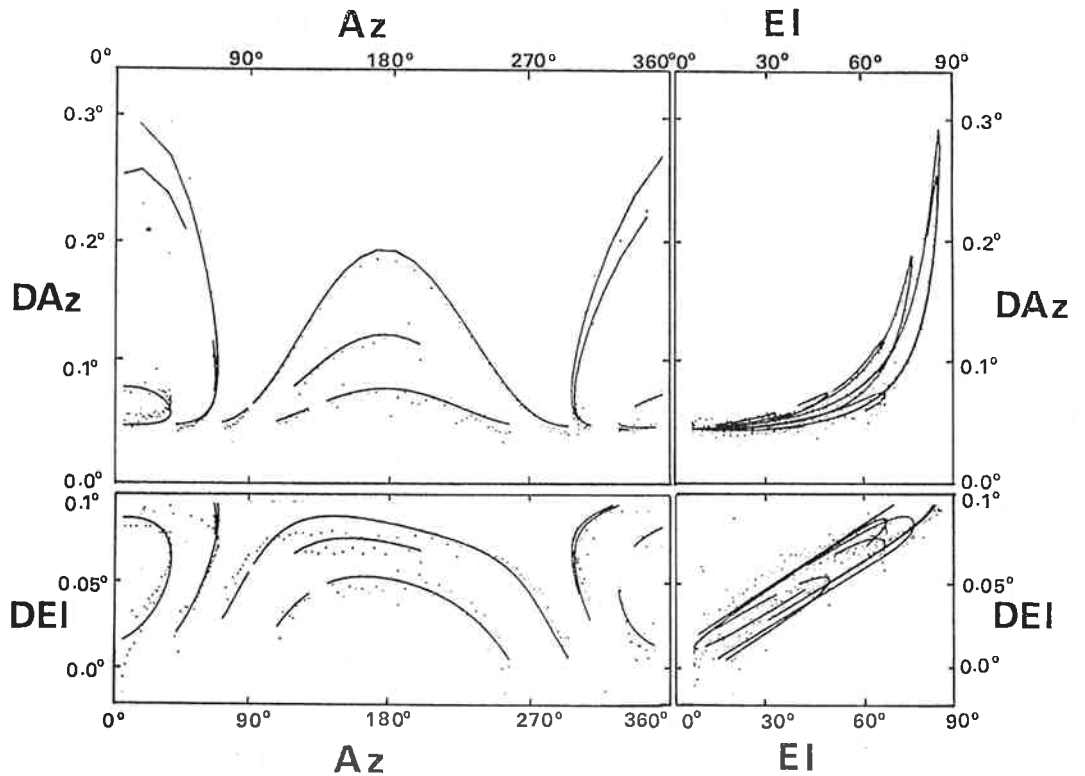
第16図 方法(3)に従って Tau A のみのデータからの推定結果 (組合せ(4))



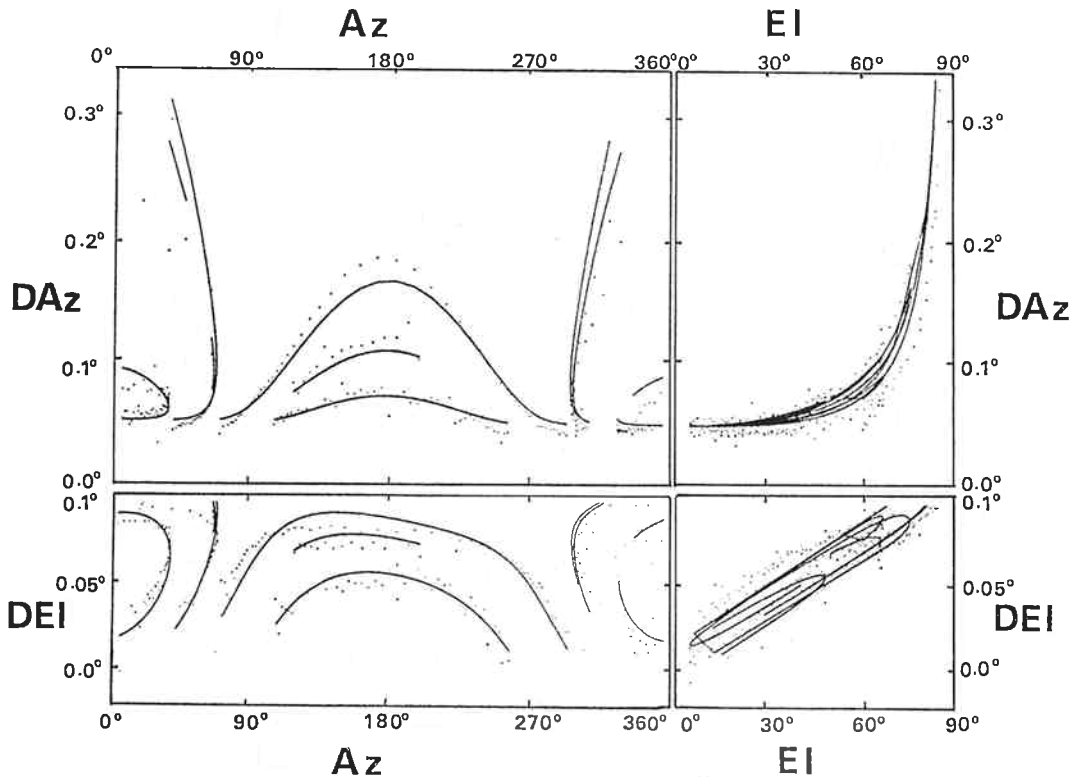
第17図 方法(2)に従って Tau A, Cyg A のデータにより推定した結果 (組合せ(11))



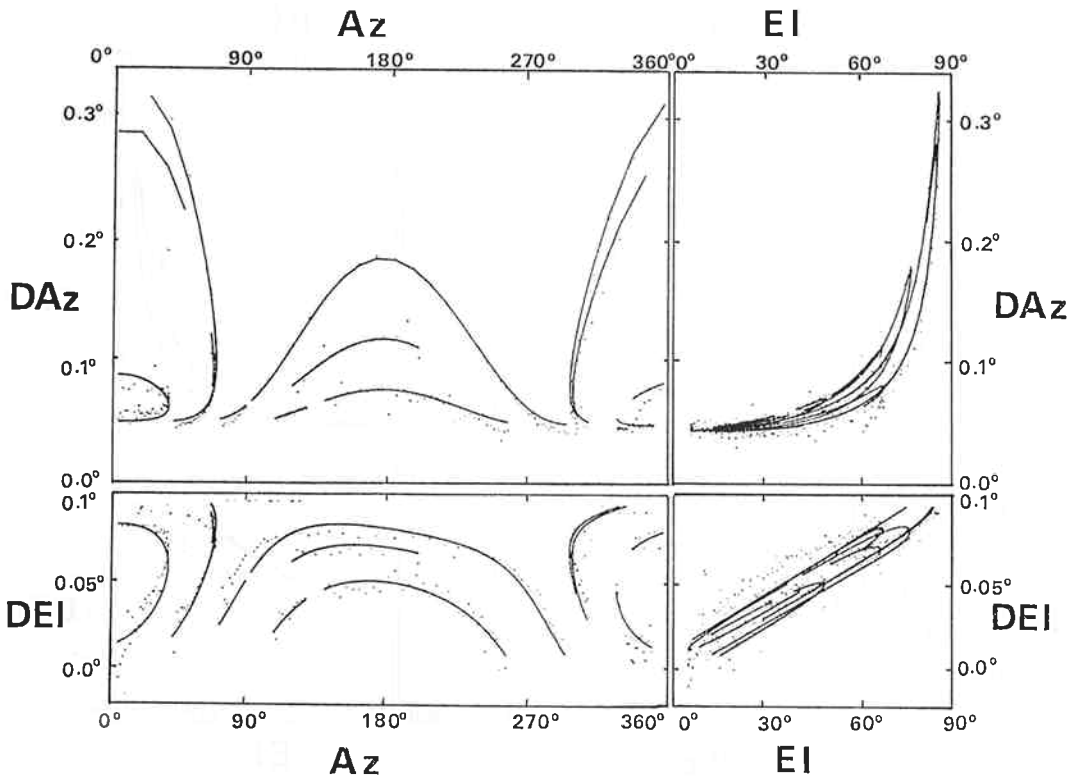
第18図 方法(3)に従って Tau A, Cyg A のデータにより推定した結果 (組合せ(12))



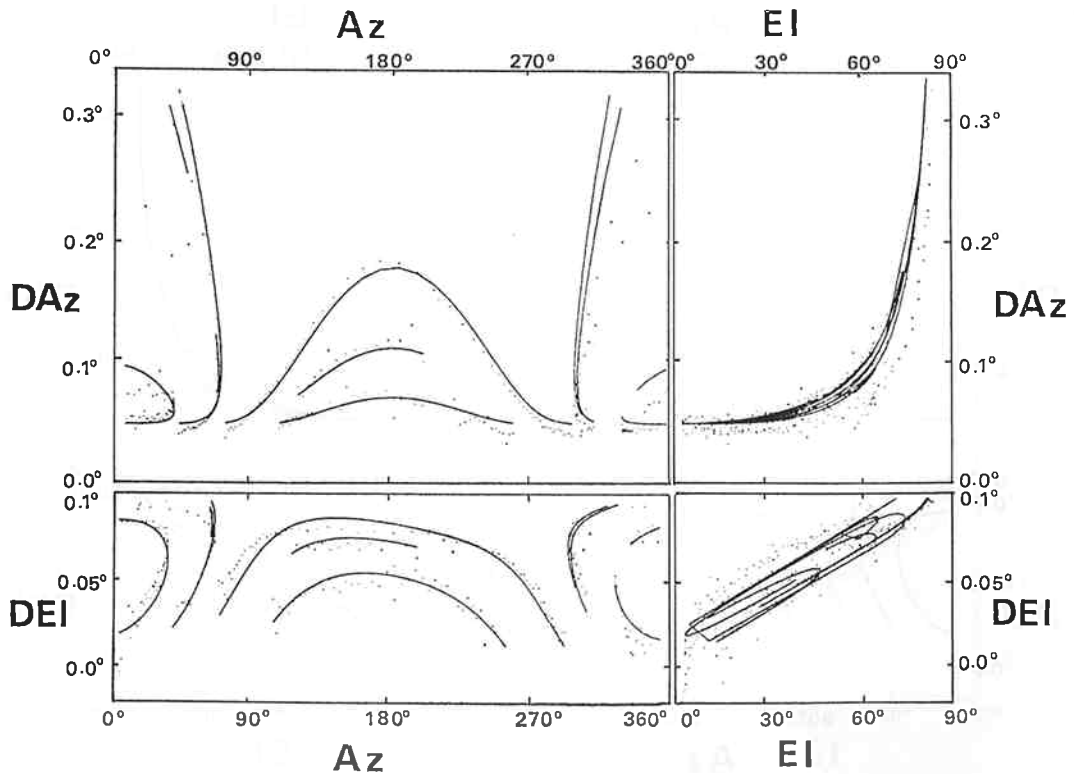
第19図 方法(2)に従って Cas A, Tau A, Ori A のデータにより推定した結果 (組合せ(21))



第20図 方法(3)に従って Cas A, Tau A, Ori A のデータにより推定した結果 (組合せ(22))



第21図 方法(2)に従って Cas A, Tau A, Cyg A, Ori A のデータにより推定した結果 (組合せ(29))



第22図 方法(3)に従って Cas A, Tau A, Cyg A, Ori A のデータにより推定した結果 (組合せ(30))



また第18式に示したパラメータを用いた2次元ベクトル場を書けば第14図のようなパターンとなる。第1の特徴は仰角が大きくなると共に特に方位角方向の誤差が大きくなることである。第2の特徴は、仰角の小さいところでも方位角方向の誤差が存在することである。これらの特徴は特に  $\epsilon, \delta$  の値が  $g$  に比べて大きいことと  $4Az_0$  が  $4EI_0$  に比べて大きいことに起因している。第3の特徴はベクトルパターンが中心対称でない点である。これは  $Az$  軸が傾いていることを示している。

パラメータ推定法は方法(2)の方が(3)より良い。方法(3)は発散しやすくかつ精度も悪い。このことは組み合わせる星の数が多くなるほどはっきりしてくる。第19図と第20図(組合せ19と20に対応)、第21図と第22図(組合せ29と30に対応)のデータと第(1), (2)式による推定カーブの比較からこの理由が推察できる。つまり方法(3)は  $4EI$  のデータから  $\xi$  を決め、 $4Az$  のデータから  $\eta$  を決めているが、第(3)式からわかるように  $\xi$  は  $Az=180^\circ$  に関して対称であり、 $\eta$  は反対称である。ところが  $4Az$  のデータにも対称成分は顕著であるし、 $4EI$  のデータにも反対称成分が強い。したがって  $\xi$  と  $\eta$  を切り離して推定することは大きな誤差を持ち込みやすくなるため、精密なパラメータ決定では方法(2)のように  $\xi$  と  $\eta$  を一緒に決めた方がよい。

逆に少ない種類の電波源からもっともらしい推定をするためには方法(3)の方が良い場合がある。これを第3表でタイプIIで示した。第15図と第16図(組合せ(3)と(4)に対応)、第17図と第18図(組合せ(1)と(2)に対応)を比較すると次のことがわかる。第15, 16図では  $Tau A$  のみで推定し、第17, 18図では  $Tau A$  と  $Cyg A$  を用いているが、電波源はそれぞれの構造を持っているため、誤差にその特徴が反映する。その特徴が  $4Az$  と  $4EI$  で異なった効果を及ぼす時方法(2)は後で決める  $4Az$  の誤差が非常に大きくなる。ところが方法(3)では  $4Az$  と  $4EI$  でのそれぞれの効果を収束するまで繰り返すことにより打ち消されるために、一見もっともらしい推定ができることがある。しかし方法(3)でも十分な精度が常に得られるとはいえず、パラメータ推定は困難と考えるべきである。

電波源の組合せとしては次のことがわかる。

- (i) 電波源の種類は多いほど良い。
- (ii) 二つの電波源の組合せならば次の順で悪くなる。

(良) Cas-A, Ori-A

↑  
Cas-A, Tau-A  
Cyg-A, Ori-A  
Cas-A, Cyg-A  
↓  
Tau-A, Ori-A  
(悪) Tau-A, Cyg-A

つまり Cas-A や Ori-A の構造の対称性が軸較正にとって都合が良く、Tau-A や Cyg-A は良くないと考えられる。

- (iii) 三つの電波源の組合せは次の順で悪くなる。

(良) Cas-A, Cyg-A, Ori-A  
↑  
Cas-A, Tau-A, Ori-A  
↓  
Cas-A, Tau-A, Cyg-A  
(悪) Tau-A, Cyg-A, Ori-A

この序列の場合 (ii) と同様 Cas-A, Ori-A が Tau-A, Cyg-A より優れている。

### 9. ま と め

- (1) 仰角・方位角の両者について 2 mdeg 程度の精度の係数が得られた。
- (2) パラメータの推定法は最初に仰角の四つのパラメータを決め、その結果得られた  $\xi, \eta$  を用いて方位角の三つのパラメータを決めるのが良い。
- (3) 観測できる電波源が少ない場合の組合せの優劣について序列がある。

### 謝 辞

軸較正観測の際、種々御配慮して下さった ECS 担当職員の方々及び御助言をくださった川尻麻大室長をはじめとする第三宇宙通信研究室の方々に感謝いたします。

### 参 考 文 献

- (1) Meeks, M. L. *et al.*; "The Pointing Calibration of the Haystack Antenna", IEEE Transaction, AP-16, No. 6, Nov. 1968.
- (2) Chauvenet, W., A Manual of Spherical and Practical Astronomy, London: Constable, 1891, ch. 6 and 7.
- (3) Smart, W. M., Combination of Observation. New York: Cambridge, 1958, ch. 6.
- (4) Kawano, N. and Inoue, M.; "Pointing Accuracy and Electrical Performance of Kashima 26 mφ Antenna, Obtained from Radio Astronomical Observations", J. Radio Res. Lab., 21, No. 107, 1974.

