

# 茨城 32m 電波望遠鏡のアンテナ性能評価

齋藤悠, 森智彦, Soon Kang Lou, 米倉覚則, 百瀬宗武, 横沢正芳 (茨城大学)

## 概要

茨城 32m 電波望遠鏡 (日立・高萩アンテナ) のアンテナ性能評価の現状を報告する。日立アンテナでは、従来の器差補正モデル式に Az 方向に 180° 周期の項を追加することで、指向誤差の RMS で 0.27' という値を得て目標精度 (0.38') を達成した。また開口率率は、C 帯で 75 - 60 % (@ El = 10 - 80 deg)、X 帯で 73 - 55 % (@ El = 20 - 80 deg) という値を得ている\*1。高萩アンテナでは制御系改修完了後の 2012 年 6 月に指向精度評価及び補正を行い、RMS = 2.0' から 0.63' に指向精度が向上した。また X 帯における開口率率は測定の結果、55 - 60 % (@ El = 10 - 70 deg) という値を得た。

## 1 はじめに

茨城 32 m 電波望遠鏡は日立・高萩 2 基のアンテナからなる。元は衛星通信用アンテナであり、電波望遠鏡への改造及びその運用を茨城大学が行っている。観測周波数帯域は C、X、K の 3 帯域であるが、先に 6 - 9 GHz 帯冷却受信機の整備が完了した日立アンテナのアンテナ性能評価を行ってきた。

日立アンテナでは 2011 年 12 月までに 2 回の指向誤差の補正を行い、指向誤差の RMS で 0.54' を達成した。しかし目標指向精度である 0.38' (HPBW の 1/10) には至らず、式 (4),(5) で示した従来の 8 器差パラメータ (PM) のモデル式 (8 PM 式) では再現困難な約 180° 周期の指向誤差の Az 依存性が見られた。そこでこの式に  $\sin(2Az)$ 、 $\cos(2Az)$  の項を加えた新規の 12 器差パラメータのモデル式 (12 PM 式) を採用した。指向誤差の実測値に新規モデル式をフィットした結果、指向誤差を良く再現できる事が分かった (図 1 参照)。そのため 2012 年 4 月に新規モデル式を用いた指向誤差の補正を行った。

高萩アンテナでは制御系を改修し天体追尾を正しく行える様になったことを受け、2012 年 6 月から指向精度及び開口率率の評価に取り掛った。

## 2 方法

日立・高萩アンテナの指向精度及び開口率率の評価は、両アンテナにおいて同じ方法を用いた。以下にその詳細を記した。

### 2.1 指向精度評価

#### 2.1.1 指向誤差の測定と指向精度評価

指向精度は、全天の多くの方位角・仰角 ( $Az$ ,  $El$ ) 方向での指向誤差 ( $dX \equiv dAz \cos El$ ,  $dEl$ ) を測定することで評価した。ここで  $dX$ ,  $dEl$  はそれぞれ  $Az$ ,  $El$  方向への指向誤差である。各方向の指向誤差は  $\text{offset} = \pm 3', 1.5'$  の 9 点十字スキャン観測を全天に渡って行うことで測定した。位置が正確に分かっている点源天体 (AGN など) を観測し、各点の  $8400 \pm 256$  MHz 帯連続波強度を Power Meter により取得した。各測定では数日掛けて 50 - 100 程度の十字スキャンを行った。そして得られた受信強

度を、 $dX$ ,  $dEl$  をそれぞれ横軸としてプロットし、両者を独立に gaussfit することで指向誤差 ( $dX, dEl$ ) を決定した。この様にして求めた指向誤差について、以下に示す平均値と標準偏差及び RMS を計算し、指向精度を評価した。

$$\text{Ave.} = \sqrt{\overline{dX^2} + \overline{dEl^2}} \quad (1)$$

$$\text{Std.} = \sqrt{\sigma_{dX}^2 + \sigma_{dEl}^2} \quad (2)$$

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N dX_i^2 + dEl_i^2}{N}} \quad (3)$$

ここで  $N$  は使用した十字スキャンデータ数、 $\overline{dX}$ ,  $\overline{dEl}$  及び  $\sigma_{dX}$ ,  $\sigma_{dEl}$  はそれぞれ  $dX$ ,  $dEl$  の平均値及び標準偏差である。

#### 2.1.2 指向誤差の補正

指向誤差は以下の様なモデル式で表す事が出来る。

$$dX = A1 \cos(El) + A3 \cos(Az) \sin(El) - A4 \sin(Az) \sin(El) + A5 \sin(El) + A7 \quad (4)$$

$$dEl = A2 - A3 \sin(Az) - A4 \cos(Az) + A6 \cos(El) + A8 \sin(El). \quad (5)$$

ここで、 $A1 \sim A8$  の未定係数はそれぞれ、 $A1:Az$  エンコーダの原点ずれ、 $A2:El$  エンコーダの原点ずれ、 $A3:Az$  軸の東西方向への傾き、 $A4:Az$  軸の南北方向への傾き、 $A5:El$  軸と  $Az$  軸の非直交性、 $A7:光軸$  と  $El$  軸の非直交性、 $A6, A8:$  重力による鏡面の弾性変形、を表し、器差パラメータ (PM) と呼ばれる。これらの式を測定した指向誤差にフィットし、 $A1 \sim A8$  の PM を求め、そこから逆に任意の方向での指向誤差を計算することで指向誤差を補正した。2012 年 4 月の測定からは、 $A9 \sim A12$  の 4 個の PM を増やすことで式 (4)、(5) に  $\sin 2Az$  と  $\cos 2Az$  の項を加えた 12 PM 式を用いた。

### 2.2 開口率率

#### 2.2.1 開口率率の定義

開口率率はアンテナが電波を集める効率である。アンテナの物理的開口面積を  $A_p$ 、有効開口面積を  $A_e$  とすると開口率率  $\eta_A$  は

$$\eta_A = A_e/A_p \quad (6)$$

と定義出来る。

\*1 平成 23 年度 茨城大学大学院理工学研究科 栗橋潤 修士論文

## 2.2.2 開口能率の推定

天体を観測したときに得られる天体のアンテナ温度  $T_A^*$  から、観測フラックス密度を

$$F_\nu^{\text{obs}} = \frac{kT_A^*}{A_p} \quad (7)$$

と定義する。ここで  $k$  は Boltzmann 定数である。 $F_\nu^{\text{obs}}$  は天体の真のフラックス密度  $F_\nu$  との間に

$$F_\nu = \frac{2F_\nu^{\text{obs}}}{\eta_A} \quad (8)$$

の関係が成り立つ。ここで係数の 2 は、観測の際に電波の直交する 2 偏波成分は別々に出力されることに因る。これより  $F_\nu$  が既知の天体に対して、 $F_\nu^{\text{obs}}$  を正確に測定する事で、式 (8) から  $\eta_A$  を推定することが出来る。

## 2.2.3 測定方法

点源と見なせる強い電波源に対して、その天体を中心とした  $20' \times 20'$  の範囲の OTF 観測を行い、ビームパターンマップを取得した。このビームパターンを 2 次元 ( $dX, dEl$ ) の軸対象 gaussian でフィットすることでピーク強度を求め、アンテナ温度及び観測フラックス密度を推定した。また開口能率の  $El$  依存性を調べるため、この OTF 観測を多くの  $El$  で行った。

この測定では開口能率だけでなく、ビームパターンからビームの半値全幅 (HPBW) の情報も得た。

# 3 観測

## 3.1 指向精度評価

### 3.1.1 日立アンテナ

日立アンテナの指向精度評価のための十字スキャン観測を 2012 年 4 月に行った (120412 測定)。この測定では 12 PM 式を用いて指向誤差を補正した。用いた PM 値は 2011 年 12 月に行った測定 (111207 測定) の指向誤差の実測値に対して 12 PM 式をフィットして求めた値である。表 1 にこの観測諸元を示した。

### 3.1.2 高萩アンテナ

高萩アンテナでは 2012 年 6 月に第 1 回の指向精度評価を行った。まず始めの 120608 測定で指向誤差を測定した。この結果に対して 12 PM 式をフィットして PM 値を決定し、その検証測定 (120616 測定) を行った。これら観測諸元を表 1 に示した。

## 3.2 高萩アンテナの開口能率測定

強度は弱いとそのフラックス密度が既知の天体 3C123 と、強度は強いとその値が変動する天体 3C273B 及び 3C84 に対して、高

萩アンテナを用いて OTF 観測を行った。観測周波数帯域は X 帯である。観測諸元を表 2 に示した。

# 4 結果

## 4.1 日立アンテナの指向精度

120412 測定の指向誤差の測定結果を図 3 に示した。12 PM 式を用いた補正により指向精度は  $\text{RMS} = 0.27'$  となり、目標値の  $0.38'$  を上回った (表 3 参照)。これより日立アンテナは C、X 両帯域において観測に十分な指向精度を得た。

## 4.2 高萩アンテナの指向精度

補正前の 120608 測定及び補正後の 120616 測定の指向誤差の実測値のプロットを図 4 に示した。補正前は  $dX, dEl$  ともに  $1'$  以上の指向誤差が見られたが、補正後は  $\text{Ave.} = 0.1'$  となり、指向精度が大きく改善した (表 3 参照)。しかし  $\text{RMS}$  は  $0.63'$  であり目標値に達していないため、今後も測定及び調整が必要である。

## 4.3 高萩アンテナの開口能率

まずフラックス密度が既知の 3C123 の測定結果に対して式 (8) を用いて開口能率を求めた。そして 3C273B 及び 3C84 の真のフラックス密度をそれぞれ  $El = 34^\circ, 65^\circ$  での 3C123 の開口能率の値を用いて推定した。この値を他の  $El$  の測定結果にも適用し、3C273B 及び 3C84 の観測フラックス密度からより正確な開口能率を推定した。ここで測定に要した 1 日程度の時間であればこれら 2 天体の強度は変動しないものと仮定した。

この結果を図 2 に示した。高萩アンテナの X 帯における開口能率は  $El = 35^\circ$  付近で約 60 % で最大となり、低及び高仰角で約 55 % に低下することが分かった。この開口能率の測定結果を  $El$  の 3 次式でフィットした結果以下の式を得た。

$$\eta_A = 0.53El^3 + 0.0040El^2 - 8.3 \times 10^{-5}El + 4.5 \times 10^{-7} \quad (9)$$

更に日立アンテナの X 帯での開口能率と比較して  $El$  依存性は小さいが、全体的な能率は低い事が明らかとなった。また取得したビームパターンマップから、高萩アンテナの主ビーム形状は軸対象であることを確認した (図 5 参照)。

# 5 今後の課題

指向精度測定の手法を簡素化し、日立アンテナに関しては指向誤差を定期的に測定しその変動の有無を観察する必要がある。高萩アンテナに関しては更なる指向精度の向上と C 帯での開口能率の測定が必要である。また 22 GHz 帯の観測では両アンテナとも更なる指向精度の向上が必要であり、これはその方法も含め今後の課題である。

表 1 指向精度測定の実測諸元

測定名 :	日立アンテナ		高萩アンテナ			
	120412		120608		120616	
観測時刻 (UTC)	12104093000	12106093000	12160100000	12162100000	12168093000	12169093000
(YYDDHHMMSS)	- 12104211430	- 12106205300	- 12160211210	- 12162200710	- 12168204210	- 12169193710
気温、天気	12.4 °C、曇り	9.9 °C、薄曇り	20.4 °C、曇り	19.6 °C、晴れ	17.7 °C、雨	晴れ
風速	~ 2 m/s	~ 2 m/s	~ 1 m/s	~ 1 m/s	~ 1 - 2 m/s	~ 1 - 2 m/s
$\tau_0$ 、 $T_{sys}$	0.0096、20.6	0.0092、20.4	0.01、22.4	0.01、22.6	0.02、26.7	0.01、22.5
観測天体	1803+784、2021+614、4C39.25、3C286、1749+096、3C273B、NRAO530、OV236		1611+343、1749+096、1741-038、1920-211、2013+370、3C45、2021+614、0212+735			
十字スキャン数	103		86			

表 2 開口率測定の実測諸元

観測天体 :	3C84	3C273B	3C123
観測日時 (UTC)	12192233000	12193022000	12193165000
(YYDDHHMMSS)	- 12293013020	- 12193074920	- 12193231420
観測 El 範囲 (deg)	73 - 59	7.2 - 55	5.6 - 77
$\tau_0$ 、 $T_{sys}$		0.01, 22 K	

表 3 指向精度実測値

測定名	日立アンテナ		高萩アンテナ	
	111207	120412	120608	120618
Ave.	0.23	0.094	1.9	0.11
Std.	0.49	0.26	0.79	0.63
RMS	0.54	0.27	2.0	0.63

単位: [arcmin]

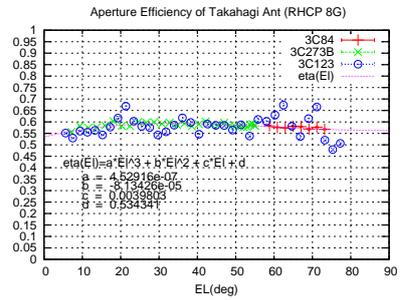
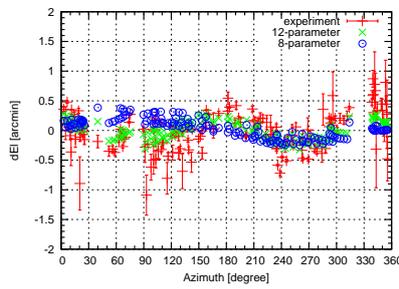
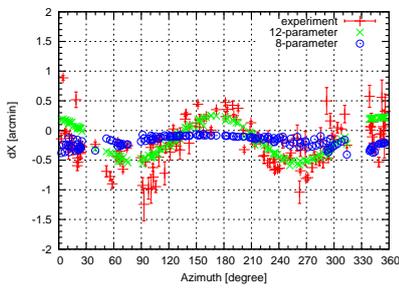


図 1 8 PM 及び 12 PM 式に因る指向誤差のフィット結果

縦軸は左図が  $dX$ 、右図が  $dEI$  で、横軸は共に  $Az$  である。+ 印が実測値のプロットであり、それに対する 8 PM 式でのフィット結果を  $\circ$  印、12 PM 式でのフィット結果を  $\times$  印でプロットしている。12 PM 式では 8 PM 式のフィット結果に比べ実測値を良く再現出来ていることが分かる。

図 2 高萩アンテナの開口率の El 依存性

横軸を  $El$  として開口率をプロットした。+、 $\times$ 、 $\circ$  印はそれぞれ 3C84、3C273B、3C123 の測定結果のプロットである。破線はこれらを  $El$  の 3 次式でフィットした結果を描いたものである。

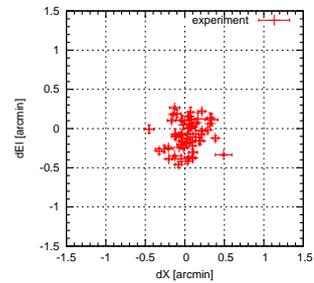
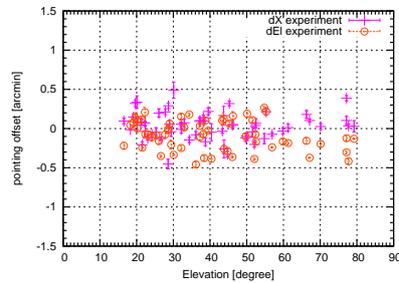
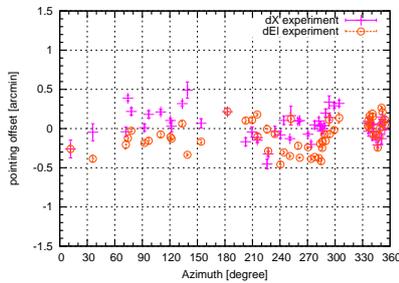


図 3 120412 測定の実測指向誤差

左及び中央の図は横軸をそれぞれ  $Az$  及び  $El$  とし、+ 印で  $dX$  を、 $\circ$  印で  $dEI$  をプロットした。右図は横軸  $dX$ 、縦軸  $dEI$  で各指向誤差をプロットした。 $dX$ 、 $dEI$  共に  $\pm 0.5'$  の範囲に収まっている。

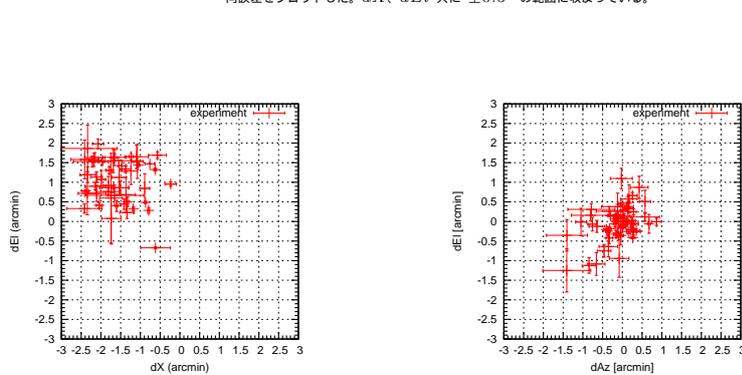


図 4 高萩アンテナ指向誤差実測値

軸は図 3 の右図と同じである。左が補正前、右が補正後の指向誤差のプロットである。 $dX$ 、 $dEI$  共に平均で  $1'$  以上あった指向誤差が補正出来たことが分かる。

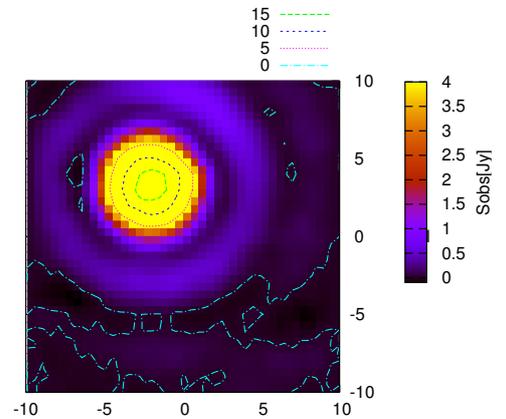


図 5 高萩アンテナのビームパターンマップ (@  $El = 37^\circ$ )

横軸  $dX$ 、縦軸  $dEI$ 、目盛の単位は arcmin である。