2012/03/08 作成

山口 32m電波望遠鏡 22 GHz 受信機による開口能率測定

山口大学 M２　宮村 太基

１．はじめに

現在、山口 32m電波望遠鏡には 22GHz 帯の冷却受信機が搭載されており、これまでにシステム雑音温度測定、ビームパターン測定が行われている。そこで今回は開口能率の測定を行った。観測天体には木星の連続波を採用し、木星を低仰角から高仰角まで追尾しながら十字スキャン法による観測を行った。以下では観測の詳細および結果を報告する。

２．観測天体の選出

開口能率測定では電波強度がよりよく決まっている天体を利用して測定を行うことが望ましい。22 GHz 帯では観測システムの感度が低くなる一方、ビームサイズが小さくなる。したがって観測に用いる天体は（A) フラックス密度が大きい、(B) 天体のサイズがビームより十分小さい、という条件を満たすことが必要である。「山口 32m電波望遠鏡 22 GHz 受信機によるビームパターン測定.pdf」でのビームパターン測定結果に示すように 22GHz 帯ビームサイズは約 1.6 分角であることが分かっているので、天体のサイズは 0.4 分角以下であることが望ましい。以上の条件を踏まえて、観測天体には木星を用いることにした。この時期の木星の視半径は約 21 秒角（視直径 42 秒）であり、ビームに対して十分小さいとはいえないが、補正を施せば十分測定に使用できる（付録参照)。また木星電波のフラックス密度は S_ν は以下の式で得られる。

$$S_\upsilon = \frac{2\upsilon^2}{c^2} kT_B \Delta\Omega$$

Ulich(1981) によれば木星の輝度温度（T_B) は 150 K（誤差 10 %以下）であり、立体角 Δ Ω を木星の視半径 21 秒角から計算して上式に代入すると 82 Jy という値が得られる。

３．観測の概要

観測の概要を表１ に示す。表１に示すように測定は 2 回行っており、12 月 12 日の測定では木星が南中から沈んでいく時間帯を、15 日の測定では木星が上がり始めてから南中して沈んでいくまでの時間帯を観測した。

測定には「十字スキャン」と呼ばれる方法を用いた。木星を追尾しながら、ビームに角度オフセットを重畳し、各オフセット点で測定される受信強度に対してガウス関数型のモデルフィット

を行い、木星のピーク強度を推定するという方法である。図１ に示すように、まず天体信号を受信しない状態（方位角に大きなオフセット＝オフ点と呼ぶ）でのパワーを測定し、次に方位角方向に－δ、0、+δ のオフセットを与え受信パワーを測定する。さらに仰角方向に－δ、+δ のオフセットを与え受信パワーを測定する。この一連の手順をスキャンと呼ぶ。

表１　観測概要

観測日 （月日）	観測時刻(JST) (h;m;s)	開始時 Az　El	終了時 Az　El
12 月 12 日	21:30:00 － 26:00:00	200°　64°	270°　15°
12 月 15 日	15:00:00 － 20:00:00	84°　10°	159°　65°
12 月 15 日	21:00:00 － 26:00:00	195°　65°	275°　12°

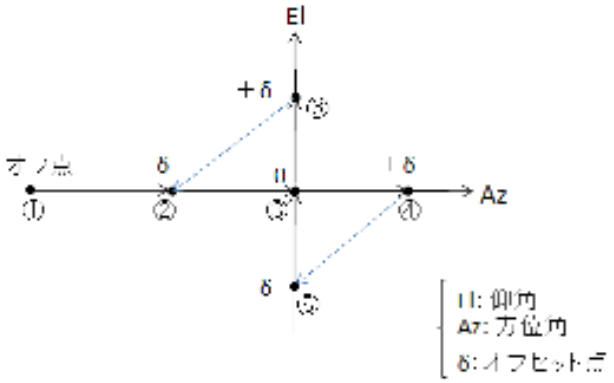


図１　十字スキャン法の模式図

今回の測定ではオフセット角 δ を 0.8 分角、各オフセット点での滞在時間を 10 秒、移動 10 秒と設定した。これより 1 スキャンに要する時間は 2 分となる。またパワーの測定はパワーメーターを用いており、VEE program というソフトウェアによって PC 上で制御されている。このソフトウェア内の設定により、4 分に 1 度ノイズソースが 10 秒間注入されるようになっている。これを利用して各スキャン毎にノイズソースの値とオフ点の値から NS 法でシステム雑音温度を求めている。それにより各スキャン時の仰角とシステム雑音温度を使って secz 法より大気の光学的厚み $\tau 0$ を算出することができる。以上より、1 スキャンに要する時間は 2 分なので 1 時間で取得できるデータ数は 30 個となる。

４．測定・解析結果

測定で得られたデータの一部を図２に示す。図中の①～⑥は図１における測定点に対応している。図のように観測中にノイズソースが 4 分間隔で注入されており、どのタイミングでも必ず

OFF 点（①）を向いている状態に設定している。□では 5 秒間ノイズソースのパワーを測り、残りの 5 秒間で OFF 点のパワーを測っている。ただし図に示すように 4 分間の間にスキャンを 2 回入れているが、後半のスキャンでは□の状態でノイズソースが注入されない。今回の解析ソフトでは各スキャンの開始 5 秒間をノイズソースの値、その後の 5 秒間を OFF 点の値として計算を行っているため、後半のスキャンデータではノイズソースの値がなく正しい結果がでない。故に実際に解析で得られるデータ数は 1 時間の観測で 15 個となる。

解析ソフト内ではまず、1 スキャンにおいて各測定点 10 秒分のデータのうちの真ん中の 5 秒間を取り出して平均した値を算出する作業を行う。ただし 5 秒間という数字はソフトに読み込ませるファイル内の HEADER 部分で指定できる。各測定点の 5 秒間のデータの平均値をそれぞれのパワーとして方位角方向の 3 点（②−③−④）に対してガウシアンフィッティングを行い、方位角方向でのパワーのピークを算出する。同様に仰角方向の 3 点（⑤−③−⑥）でもフィッティングを行い、ピークパワーを算出する。方位角方向のパワーのピーク値を P_{az}、仰角方向のピーク値を P_{el}、天体の中心を向いているとき（③）の値を P_{on} とすると真のピーク値 P_{int} は

$$P_{\mathrm{int}} = \frac{P_{as}}{P_{on}} P_{el}$$

という関係で表される。この計算をソフト内で各スキャンに対して行い、真のピーク値を求める。また同時に測定点□のデータからシステム雑音温度 T_{sys} も計算しており、T_{sys} の値と真のピーク値、OFF 点（①）のパワー値からアンテナ温度 Ta を計算する。また、パワーメーターには時刻も記録されており、その時刻と天体の座標情報、山口 32 m の位置情報から各スキャンにおけるアンテナの方位角、仰角の値も計算される。最終的にこれらの計算結果をまとめたものをテキストファイルとして出力する。

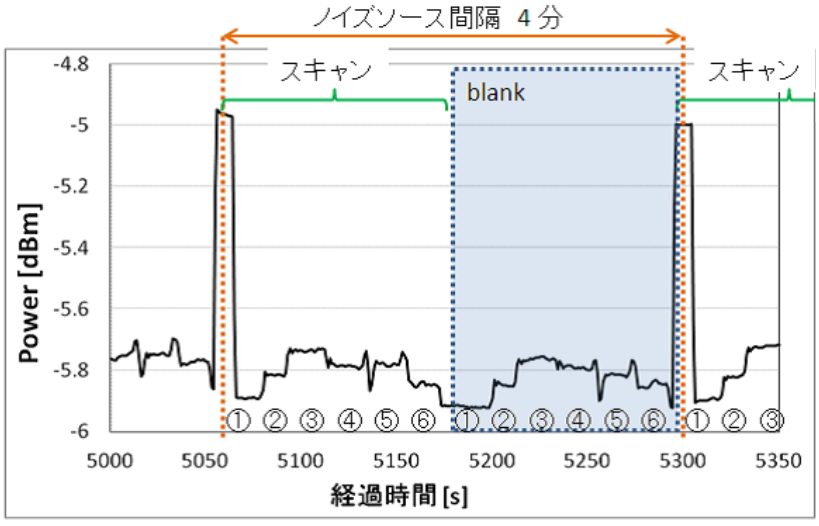


図 2　十字スキャン法観測でパワーメーターから得られのパワー

その後の処理ではまず､出力されたテキストファイル内の仰角とシステム雑音温度の値を用いて secz 法により大気の光学的厚み τ_0 を求める。その τ_0 の値を用いて大気の吸収量を補正したアンテナ温度 T^*_a を計算し、開口能率を求めた。これらの作業にはエクセルを用いた。

以上の解析処理は次に示す計算方法に基づいて行っている。

・開口能率の計算方法

アンテナを天体に向けたときに得られるパワーP_{on}、天体のない領域(sky）に向けたときに得られるパワーP_{off} 、システム雑音温度 T_{sys}、アンテナ温度 T_a の関係は次式で表される。

$$\begin{aligned} P_{off} &= G\left\{T_{RX} + T_{amb}\left(1-e^{-\tau}\right)\right\} \\ &= GT_{sys} \\ P_{on} &= G\left\{T_{RX} + T_{amb}\left(1-e^{-\tau}\right) + T_a^* e^{-\tau}\right\} \\ &= G\left(T_{sys} + T_a\right) \end{aligned}$$

これから両者の比をＹとすると

$$Y = \frac{P_{on}}{P_{off}} = \frac{G\left(T_{sys} + T_a\right)}{GT_{sys}}$$

となる。この式を用いるとアンテナ温度は

$$\begin{aligned} T_a &= T_{sys}\left(Y-1\right) \\ T_a^* &= T_a\left(e^{-\tau}\right)^{-1} = T_a e^{\tau} = T_{sys} e^{\tau}\left(Y-1\right) \end{aligned}$$

と表すことができる。ただし、$\tau = \tau_0 \mathrm{secz}$（$\tau_0$：天領での大気の光学的厚み）である。この式より P_{on}・P_{off}・τ_0 を測定することで大気の吸収量を補正したアンテナ温度 T^*_a が得られる。また、T^*_a と開口能率の関係は次式で表される。

$$2kT_a^* = \eta A_p S_\upsilon$$

と表せる。k はボルツマン定数[J/K]、A_p はアンテナの開口面積[m²] である。これからフラックス密度の値が既知である天体を観測し、T^*_a を測定することで開口能率 η が得られる。

・解析結果

解析の結果得られた天頂における大気の光学的厚み τ_0 の値を表２ に、開口能率の値を仰角に対してプロットしたものを図３～５ に示す。

表２　天頂での大気の光学的厚み

観測日 （月日）	観測時刻（JST） （h:m:s）	天頂大気の厚み	気温 [℃]
12 月 12 日	21:30:00－26:00:00	0.077	8.5
12 月 15 日	15:00:00－20:00:00	0.087	9.3
12 月 15 日	21:00:00－26:00:00	0.063	5.5

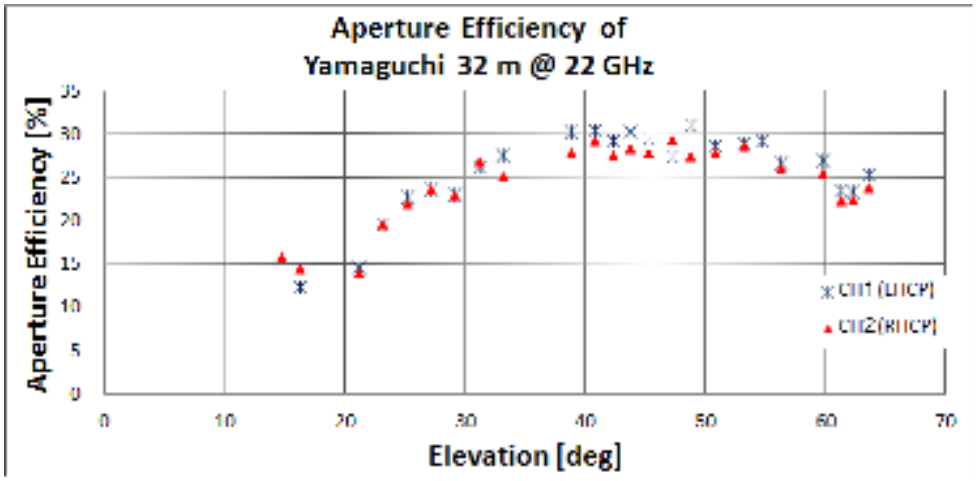


図３　12 月 12 日開口能率測定結果

この観測では手入力でアンテナ駆動 PC にオフセットを指示し、パワーメーターの値を記録したため１ スキャン２ 分とはなっておらず測定点が少なくなっている。

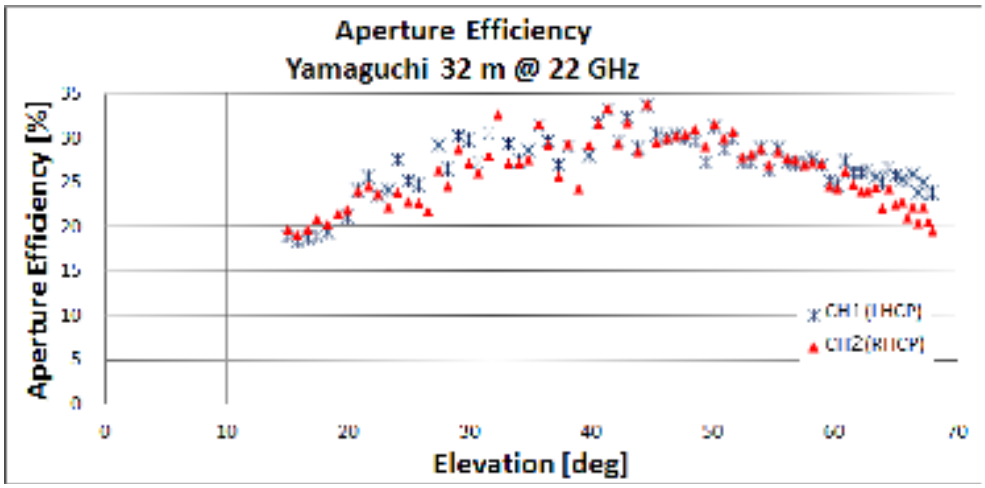


図４　12 月 15 日前半開口能率測定結果

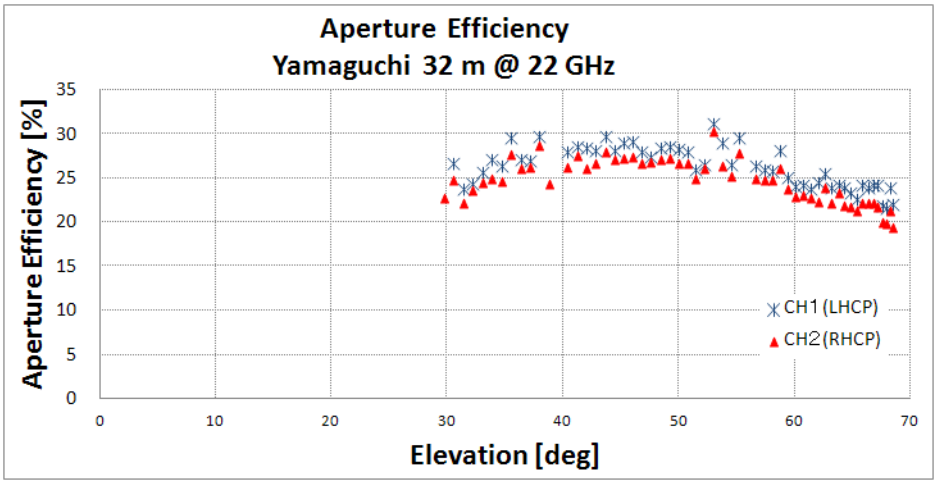


図５　12 月 15 日後半開口能率測定結果

解析の結果、開口能率は約 30 %という値が得られた。この値は 2006 年時と同等の結果でる。また、今回は 2006 年時よりも広い範囲での結果が得られており、高仰角、低仰角で開口能率の低下が見られる。これは仰角が 30～45 度の範囲に最適化してアンテナが設計されていることが原因と考えられる。

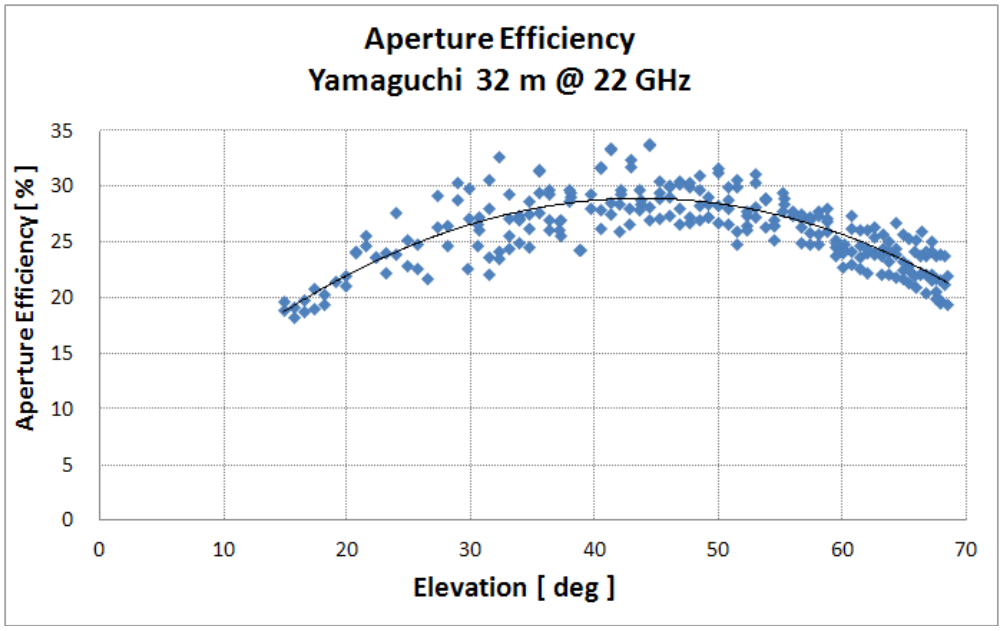


図６　12 月 15 日の前後半をまとめた開口能率の結果

図６には 12 月 15 日の前後半 2 回分のデータをまとめたものを示した。2 次多項式と 3 次多項式によるフィッティングではデータと多項式の相関係数が一致し、4 次多項式では相関係数が小さくなったため、最適当てはめ曲線は 3 次多項式を用いた。最適当てはめ曲線は次式で表される。

$$\eta = -3.871\times10^{-6}el^3 - 1.180\times10^{-2}el^2 + 1.055el + 5.700$$

el は仰角[度] である。この当てはめ曲線から計算される開口能率によると低仰角では 4 度以下で開口能率が 10 %を下回り、高仰角では 83 度以上で 10 %を下回る結果が得られた。

また、開口能率 30 %という値を評価するためにシステム雑音温度 140K、観測帯域 32MHz、積分時間 1 秒という仮定を用いて最小検出フラックス密度を計算すると

$$\sigma_{\min} = \frac{2kT_{sys}}{\eta A_p \sqrt{\tau \Delta \upsilon n}} = 0.28Jy$$

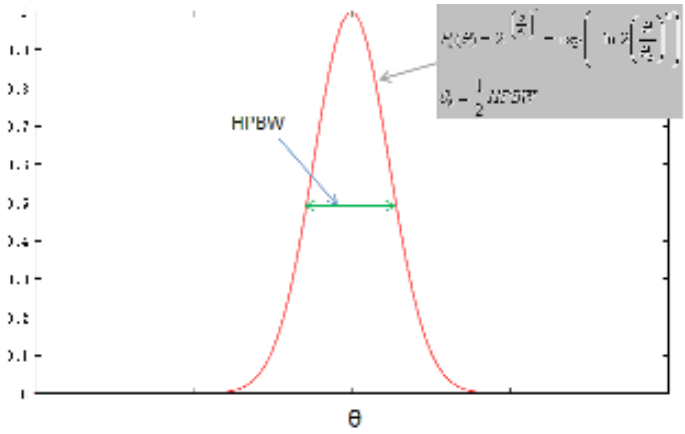
という値が得られる。ここで k はボルツマン定数、τ は積分時間、$\Delta\ \nu$ は帯域幅である。同様の計算を VERA 水沢局 20 m で行ってみる。2010 年 VERA ステータスレポートによると水沢局 22GHz における開口能率は 50 %、システム雑音温度は 150K であり、以下同条件を仮定すると最小検出フラックス密度は 0.47 Jy となり、山口 32 m での 22 GHz において開口能率 30 %という値は水沢局より 1.6 倍良い値であるといえる。

付録Ａ．　木星受信時のフラックス密度の補正

山口 32m における 22GHz 帯のビームサイズは約 1.5 分角であり、それに対して木星の視半径は 21 秒角である、木星のサイズを視直径に直し、さらに単位を分角に直すと 0.7 分角となりビームに対して十分点源とみなすことはできず、観測で得られるパワーはなまされたものとなることが予想される。その補正方法を説明する。

まず、一様輝度 B_0 [W sr^{-1} m^{-2} Hz^{-1}] を持った角サイズ θ_1[分角] の天体を考える。

$$B_\upsilon = \begin{cases} B_0 & (0 < \theta < \theta_1) \\ 0 & (\theta > \theta_1) \end{cases}$$



図Ａ－１　ビームパターン模式図

この天体に対して図 A-1 のようなガウス関数で表されるビームで観測する場合を考える。

$$P_\upsilon = \exp\left[-\ln 2 \left(\frac{\theta}{\theta_b} \right)^2 \right]$$

この場合得られるフラックス密度は次式で表される。

$$\begin{aligned} S_\upsilon &= \int_\Omega B_\upsilon P_\upsilon d\Omega \\ &= \int_0^{\theta_1} 2\pi B_0 \theta P_\upsilon d\theta \\ &= 2\pi B_0 \int_0^{\theta_1} \theta \exp\left[-\ln 2 \left(\frac{\theta}{\theta_b} \right)^2 \right] \end{aligned}$$

ここで $\theta^2 = t$ と置き、θ で微分すると

$$\frac{dt}{d\theta} = 2\theta \quad \rightarrow \quad d\theta = \frac{1}{2}\theta dt \qquad \left[t : 0 \rightarrow \theta_1^2\right]$$

となる。これを用いて先ほどの式を書き換えると

$$\begin{aligned} S_\upsilon &= \pi B_0 \int_0^{\theta_1^2} \exp\left[-\frac{\ln 2}{\theta_b^2} t\right] dt \\ &= \pi B_0 \frac{\theta_b^2}{\ln 2}\left[1 - \exp\left(-\ln 2 \frac{\theta_1^2}{\theta_b^w}\right)\right] \end{aligned}$$

という結果が得られる。

次に、天体のサイズがビームに対して十分小さい場合のフラックス密度は次式のようになる。

$$S_{\upsilon 0} = B_\upsilon \Omega = \pi B_0 \theta_1^2$$

式（）（）を割り算すると

$$\frac{S_\upsilon}{S_{\upsilon 0}} = \frac{\theta_b^2}{\theta_1^2 \ln 2}\left[1 - \exp\left(\ln 2 \frac{\theta_1^2}{\theta_b^2}\right)\right]$$

となる。これより、計算で求められるフラックス密度と観測で得られるフラックス密度の比がわかる。木星の視半径 21 秒角、22GHz 帯ビームサイズ 1.5 分角を代入してこの比を求めると $S_v/S_{v0} =$ 0.98 となる。したがって開口能率の値を算出する際には計算で得られる木星電波のフラックス密度に 0.98 掛けた値を用いればよい。