# 22GHz 受信機単体試験および山口 32 m電波望遠鏡への搭載試験

山口大学 M2 宮村 太基

# 1 はじめに

2011 年 8 月に山口 32 m電波望遠鏡用の 22GHz 帯冷却受信機の製作が終了したので受信機単体での性能測定試験を行った。受信機内部の LNA 以降の IF 部は 2006 年時の 22GHz 帯 VLBI 試験で用いたダウンコンバータを使用し、8GHz 帯に周波数変換を行った後のパワーをスペアナに出力した。また、受信機雑音温度測定には常温の黒体と液体窒素に浸した黒体 (77K)を使ったHot-Cold 法を用いた。

受信機単体試験で良い性能が示されたので、2011 年 12 月 5 日から山口 32 m電波望遠鏡において、22GHz 受信機の搭載作業を行った。また、搭載後、受信機内部の真空引き・冷却作業を行った。ここでは以上の作業・試験に関して報告を行う。

# 2 受信機単体試験

冷却デュワー内にポーラライザー、LNA を搭載し受信機単体の雑音温度測定を行った。22GHz 帯ではケーブル損失が大きいので 2006 年 22GHz 帯 VLBI 観測時に使用したダウンコンバータを 使用し 8GHz 帯に周波数を下げた信号をパワーメーターに出力した。この状態では出力パワーレ ベルが低いので LNA とダウンコンバータの間に 22GHz 帯常温 AMP を接続した。図1 に受信機 単体試験時のシステムブロック図を示す。ここで冷却デュワー上部のテーパ管からダウンコンバー タ出力までを受信機単体とする。



#### 受信機単体雑音温度測定

受信機単体の雑音温度測定には Hot-Cold 法を用いた。まず、図1に示すように常温の黒体( $T_{Hot}$ )でテーパ管の開口面を覆ったときに得られるパワー( $P_{Hot}$ )を

$$P_{Hot} = G(T_{RX} + T_{Hot}) \tag{1}$$

同様に液体窒素に浸した黒体 ( $T_{Cold}$ ) で覆ったときに得られるパワー ( $P_{Cold}$ )を

$$P_{Cold} = G(T_{RX} + T_{Cold}) \tag{2}$$

と表す。この2式を割り算して単体の受信機雑音温度T<sub>RX</sub>についてまとめると

$$\frac{P_{Hot}}{P_{Tax}} = \frac{T_{RX} + T_{Hot}}{T_{Tax} + T_{Tax}} \tag{3}$$

$$P_{Cold} = \frac{T_{RX} + T_{Cold}}{T_{RX}} = \frac{P_{Cold}T_{Hot} - P_{Hot}T_{Cold}}{P_{Hot} - P_{Cold}}$$
(4)

が得られる。

上述の測定を行って得られた受信機単体雑音温度を表1に示す。

表1 Hot-Cold 法による受信機単体雑音温度測定結果

CH1		CH2		
$T_{RX}[K]$	$\sigma[{\rm K}]$	$T_{RX}[\mathbf{K}]$	$\sigma[K]$	
48.80	0.41	46.82	0.37	

表の  $T_{RX}$  は 5 回の測定結果の平均値となっている。また  $\sigma$  は測定結果の標準偏差を示している。結果としてどちらも目標であった 50K を達成した。

● ノイズソース試験測定

製作したノイズソース固定ホルダーを使用してノイズソースから注入される雑音温度測定 を行った。ノイズソース固定ホルダーを用いて同軸ケーブルを挿入している様子を図2に示 す。

測定は Hot-Cold 法と R-NS 法を並行して行った。Hot-Cold 法で受信機雑音温度を測定し、 その値を R-NS 法に利用してノイズソースの雑音温度を算出するためである。R-NS 法に関 しては 5 章で後述するため、ここでは R-NS 法で使用する式を示す。

$$T_{RX} = \frac{T_{NS}}{\frac{P_{NS}}{P_{R+NS}} - 1} - T_{amb}$$
(5)

ここで  $T_{NS}$  はノイズソースの雑音温度、 $P_{NS}$  はノイズソース注入時のパワー、 $P_{R+NS}$  は 常温のアブソーバーを被せた状態でノイズソースを注入したときのパワー、 $T_{amb}$  は環境温 度である。この式を  $T_{NS}$  について整理すると

$$T_{NS} = (T_{RX} + T_{amb}) \left(\frac{P_{NS}}{P_{R+NS}} - 1\right)$$
(6)



図2 (左)ノイズソース用同軸ケーブル挿入の様子、(右)ノイズソース固定ホルダー

よって上式に Hot-Cold 法で求めた  $T_{RX}$  を代入することで  $T_{NS}$  を算出することができる。 測定結果を表 2 に示す。ノイズソース用同軸ケーブルの挿入加減は  $P_R$  と  $P_{R+NS}$  が約 2 dB になるように調整した。測定は 5 回行い、 $P_R$ 、 $P_{R+NS}$ 、 $P_{Cold}$ のパワーを測定した。そ の結果、 $T_{RX}$  は CH1 が 52.6 K、CH2 が 48.8 K となり、ノイズソースを導入していない 表 1 の結果より高い値となった。この原因はアイフランジに挿入している同軸ケーブルの真 線が電波が通る導波管内まで出ているため、物理的に電波を妨害してしまったことだと考え ている。しかし結果としてノイズソースの雑音温度を見積もることができた。これにより、 ノイズソースによるシステム雑音温度校正が十分可能であることが期待される。

- 3 IF 部の設計
- 3.1 8GHz 帯 IF 部

22GHz 帯観測システムの後段で使用する 8GHz 帯ダウンコンバータ(以下 8GHz-D/C)を図 3 に、ダウンコンバータ内 IF 系のブロック図を図 4 に示す。

2 つのダウンコンバータの下のラックから IF 信号が送られており、カップラーを使用して 8GHz-D/C と 8GHz-VLBI 用 D/C に信号を送っている。22GHz 帯観測システムにおいては下段の 8GHz-VLBI 用 D/C は使用しない。CH1 と CH2 のカップラーはロスの値に 10dB の差があるが、 8GHz-D/C 内 IF 系によって出力レベルが同程度になるように調整されており、カップラーの前部 から 8GHz-D/C の出力部の間におけるゲインは両チャンネルともに 46 dB となっている。

表 2 Hot-Cold 法による受信機単体雑音温度測定結果						
CH1						
$P_R[dBm]$	$P_{R+NS}[dBm]$	$P_{Cold}[dBm]$	$T_{RX}[K]$	$T_{NS}[\mathbf{K}]$		
-5.05	-2.98	-9.39	52.92	215.51		
-5.04	-2.97	-9.38	52.92	215.51		
-5.04	-2.96	-9.38	52.92	216.82		
-5.03	-2.95	-9.38	52.45	216.53		
-5.02	-2.96	-9.38	51.98	213.63		
CH2						
$P_R[dBm]$	$P_{R+NS}[dBm]$	$P_{Cold}[dBm]$	$T_{RX}[K]$	$T_{NS}[\mathbf{K}]$		
-4.80	-2.68	-9.29	46.08	217.78		
-4.82	-2.67	-9.28	47.40	222.54		
-4.84	-2.83	-9.25	49.66	205.79		
-4.80	-2.73	-9.23	48.75	212.96		
-4.84	-2.81	-9.20	51.98	209.74		

 CH1 (LHCP)
 CH2 (LHCP)

 SGHz-D/C
 V00-CV

 V00-CV
 V00-CV

 SGHz-VLBI用D/C
 CH1 (LHCP)

 CH1 (LHCP)
 CH1 (LHCP)

図3 (左) 8GHz-D/Cの写真、(右) 8GHz-D/C内IF系



図 4 8GHz-D/C のブロック図

8GHz-D/Cの出力直前のバンドパスフィルター(BPF)は中心周波数(CF)が8430 MHz、帯 域幅(BW)が500 MHz となっている。出力信号は直前で Divider によって分割され、うち片 方はパワーメーターに出力される。8GHz 帯連続波観測ではこのパワーメーターの値をソフトで 読み取んで、結果を解析している。8GHz 帯ライン観測では8GHz-D/Cの後段に VLBI Sampler Interface(VSI)を使用し、周波数をさらに下げ帯域32 MHz に絞ったものの出力を VSSP32 サ ンプラーでデジタル信号に変換して PC 内に記録し、PC 内でフーリエ変換処理を行って解析して いる。22GHz 帯観測システムも同様に連続波、ライン観測を行うことを想定している。

### 3.2 1st-ダウンコンバータ設計

図 6 に設計した 22GHz 帯ダウンコンバータ(以下 1st-D/C)を含む観測システム全体の模式図 を示す。LNA の直後に 22GHz 帯常温 AMP を導入した理由は 22GHz という高周波数によるケー ブルロスをカバーし、パワーレベルが高い状態を維持させるためである。また初段の Local 信号周 波数を 13.8 GHz にすることで水メーザーの中心周波数が観測帯域の中心付近になるよう設定した (図5)。表3には常温(280Kを仮定)の黒体からの放射を受信した場合における 8GHz-D/C 出力 までのパワーレベルをまとめている。図7 はその表をグラフにしたものである。表中の 8G-D/C の値はカップラー前部から 8G-D/C の出力までの部分におけるゲインである。1st-D/C は両チャ ンネルにおいて同じ性能の部品を使用しているので表3の値は共通とする。常温 AMP のゲイン は規格値を用いており、±3 dB の変動幅をもっている。







 $\mathbf{6}$ 

		Loss/Gain	Power level
No.	Name	[ dB ]	[ dB ]
1	Absorber	-74.1	-74.1
2	LNA	37.0	-37.1
3	cable1	-3.0	-40.1
4	cable2	-3.0	-43.1
5	22G-AMP	33.0	-10.1
6	BPF	-3.2	-13.3
7	ISO	-1.0	-14.3
8	Mixer	-8.0	-22.3
9	ISO	-1.0	-23.3
10	BPF	-3.8	-27.1
11	V-ATT	-1.0	-28.1
12	cable3	-14.0	-42.1
13	Att	-6.0	-48.1
14	8G-D/C	46.0	-2.1

表3 22GHz 帯 IF 系におけるパワーレベル



図 7 22GHz 帯 IF 系におけるレベルダイヤグラム

# 4 22GHz 带受信機設置作業

#### 4.1 受信機支持機構の設計

22GHz 帯受信機を山口 32m のフィードホーンに接続した場合、約 70kg の受信機をテーパ管と フィードホーンの接続部だけで保持することは難しく、またフィードホーンの開口部を損失する可 能性もある。故に受信機を押し上げる方向へはたらきかける機構の設計が必要となる。そこで図 8 のような機構を設計した。また受信機デュワーの下部構造の模式図を図 9 に示す。

まず作業トンネル壁面の4カ所にコの字型のSUSパイプを加工して作成したL字サポートを設置 し、その上にSUSパイプBを取り付ける。さらにその上に長ネジを用いてSUSパイプAを接続 させ、SUSパイプAの上に受信機を搭載する。長ネジを通してあるSUSパイプA、Bそれぞれを 挟むようにナットを取り付け、SUSパイプB側を固定した状態でSUSパイプA下部のナットを 締めていくことでSUSパイプAごと受信機を押し上げる構造になっている。

### 4.2 設置作業

受信機の吊り上げには2台のチェーンブロックを用いた。チェーンブロック本体は巻取り室の フィードホーンを囲むように作られているフレームに取り付け、チェーンは作業トンネル内を通し て観測機器室にある受信機に繋がれる。L字サポートは設置作業の前に取り付けた。以下に受信機 設置作業の手順を示す。

- 1) チェーンブロックを用いて受信機上部テーパ管とフィードホーン底面の間隔が数センチと なる位置まで吊り上げる。
- フィードホーンとテーパ管を接続する計8カ所のネジ穴のうちの4カ所にガイドネジを通し、軸を合わせる。
- 3) ガイドネジを徐々に締めていきテーパ管とフィードホーンの間隔が 1 cm 以下となる位置 まで調整する。
- 4) 空いている4カ所に本ネジを通した後、4カ所のガイドネジを外して本ネジをつけ直す。その後8カ所の本ネジをしっかりと締めて接続部を固定する。
- 5) L 字サポートの上に 2 本の SUS パイプ B を設置する。
- 6) SUS パイプ A を受信機下部に接続し、SUS パイプ A、B に長ネジおよびナットを取り付ける。
- SUS パイプ B の上下をナットで挟み固定した後、SUS パイプ A の下側のナットを締めて いき受信機を固定する。

図 10 に設置作業時の様子を、図 11 に作業完了後の受信機の写真を示す。



図 8 22GHz 帯受信機搭載機構





図 10 受信機設置作業の様子、(左)観測機器室側(右)巻取り室側



図 11 設置された 22GHz 帯受信機

## 4.3 真空引き・冷却試験

まず真空引きを行い、デュワー内の気圧が1 Pa を下回った後コンプレッサーを動作し冷却を 行った。試験中のデュワー内の気圧の記録はコンプレッサー動作前までは30秒間隔、動作後から は1分間隔で行い、その後しばらくして値が安定した頃からは5分間隔で記録を行った。デュワー 内の温度センサーはポーラライザーに取り付けられているので、温度モニターに表示される値は ポーラライザーの温度となる。温度のモニタリングは観測機器室内 PC と繋がっている Web カメ ラで1分毎にモニター表示画面を撮影するという方法で行った。上記の作業で得られた結果を図 12、図 13 に示す。

図 12、図 13 の結果より真空引きでは開始から約 30 分で 1 Pa を下回り、冷却では約 5 時間で 12K まで温度が下がったことが分かった。デュワー内温度はその後 1 時間程度で 10K まで下がったと ころで安定した。

## 5 試験受信

IF 部の整備を行い、W49N の水メーザー天体の試験受信を行った。1st-D/C に入力する Local 信号はシンセサイザーを用いて 13.8 GHz の周波数信号を送った。それにより、観測中心周波数 は 22.235 GHz となる。天体のスペクトルは 8GHz 帯 D/C の出力をスペクトルアナライザーに接 続して確認した。8GHz 帯 D/C 内の Local 信号の周波数は固定 (7680MHz) なので天体の信号は 22.235 - 13.8 - 7.68 = 0.755 GHz(755 MHz) 付近にみえるはずである。

試験受信の結果、得られたスペクトルを図 14 に示す。

綺麗な W49N の水メーザースペクトルが検出された。このスペクトルの結果をみると、ピーク強度はノイズフロアから約 10dB 高いところにみられる。この値からシステム雑音温度を 150K と仮定してフラックス密度を計算すると約 16000Jy という値が得られる。



図 12 受信機デュワー内気圧の時間変化。経過時刻 4000 秒付近で急激に気圧が低下しているのは冷却に よりデュワー内部の温度が摂氏 0 度を下回り、内部に残っていた水分が凝固したためである。



図 13 デュワー内温度の時間変化



図 14 22GHz 帯 W49N 水メーザースペクトル

Center Freq:755 MHz , Span:20 MHz , Log scale:2 dB/ , Ref Level:-41.10 dBm