

山口 32 m電波望遠鏡用 22GHz 受信機によるシステム性能測定

山口大学 M2 宮村 太基

1 はじめに

2011 年 12 月 5 日から山口 32 m電波望遠鏡において 22GHz 帯冷却低雑音受信機の搭載作業を行った。その後、受信機の真空引き・冷却作業を行い、受信機内部を 10K 程度まで冷却できたことを確認した。故に今回は 22GHz 受信機の性能評価としてシステム雑音温度、受信機雑音温度の測定を行った。また、観測システムの校正にはノイズソースを用いる予定であり、ノイズソースの測定試験も行った。以下でその報告を行う。

2 測定

システム雑音温度測定にかかわる観測システムブロック図を図 1 に示す。今回製作した受信機の校正部としてデュワーとホーンの間にフランジがあり、ノイズソースが接続されている。測定はアブソーバ（黒体）でホーンの開口面を覆った状態（R）と外した状態（s k y）でそれぞれパワーメータで測定される値をさまざまな仰角に対して行った。さらにノイズソースの温度を測定するために s k y のときにノイズソースを注入した状態（s k y + N S）と R のときにノイズソースを注入した状態（R + N S）のパワーも並行して行った。R 状態ではアンプゲインが変動しない限りどの仰角においても同じ結果が得られると期待されるが、今回はすべての仰角で R を測定した。

3 システム雑音温度モデル

解析には次のモデルを用いた。大気の等価温度を T_{atm} 、大気の光学的厚みを τ 、フランジを通して注入される雑音温度を T_{NS} 、受信機雑音温度を T_{RX} 、環境温度を T_{amb} 、アンプゲインを G 、受信パワーを P とする。また大気外には宇宙背景放射の 3 K が存在するがここでは無視する。また以下の計算では $T_{atm} = T_{amb}$ の仮定をおいている。ビーム伝送・給電・受信部の反射は無視する。図 1 の「Tsys def point」はフランジの位置がシステム雑音温度の定義点であることを示す。

このモデルにおいて、ノイズソースを OFF、アブソーバを被せない状態（s k y）でパワーメータ（PM）で測定される雑音パワー P_{sky} は

$$P_{sky} = G\{T_{RX} + T_{amb}(1 - e^{-\tau})\} \quad (1)$$

$$= GT_{sys} \quad (2)$$

となる。なお、システム雑音温度は次式で表される。

$$T_{sys} = T_{RX} + T_{amb}(1 - e^{-\tau}) \quad (3)$$

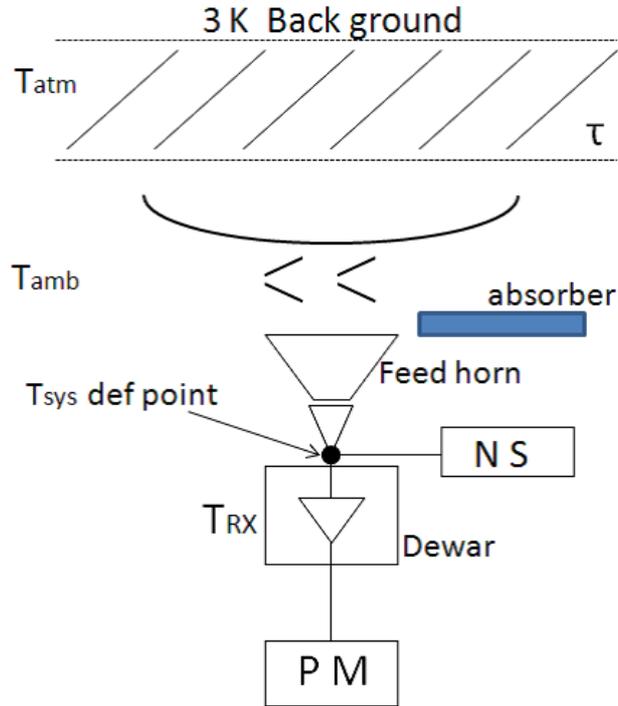


図1 システム雑音モデルの模式図

同様に、ノイズソースをON (sky + NS)、アブソーバを被せた状態 (R)、アブソーバとノイズソース (R + NS) の各状態について測定されるパワーを以下にまとめると

$$\text{SKY} \quad : \quad P_{sky} = G\{T_{RX} + T_{amb}(1 - e^{\tau})\} \quad (4)$$

$$\text{SKY} + \text{NS} \quad : \quad P_{sky+NS} = G\{T_{RX} + T_{amb}(1 - e^{\tau}) + T_{NS}\} \quad (5)$$

$$\text{R} \quad : \quad P_R = G\{T_{RX} + T_{amb}\} \quad (6)$$

$$\text{R} + \text{NS} \quad : \quad P_{R+NS} = G\{T_{RX} + T_{amb} + T_{NS}\} \quad (7)$$

これら 4 個の測定値からシステム雑音温度 T_{sys} を計算する方法は以下の 2 通りである。

- R-sky 法

P_R と P_{sky} の比を Y_1 とすると

$$Y_1 = \frac{P_R}{P_{sky}} = \frac{G\{T_{RX} + T_{amb}\}}{G\{T_{RX} + T_{amb}(1 - e^{\tau})\}}$$

これから

$$T_{sys}^* = \frac{T_{amb}}{Y_1 - 1} = T_{sys}e^{\tau} \quad (8)$$

を得る。これは「大気の吸収量を含んだシステム雑音温度」である。

- NS 法

P_{sky+NS} と P_{sky} の比を Y_2 とすると

$$Y_2 = \frac{P_{sky+NS}}{P_{sky}} = \frac{G\{T_{RX} + T_{amb}(1 - e^\tau) + T_{NS}\}}{G\{T_{RX} + T_{amb}(1 - e^\tau)\}}$$

となり、これから

$$T_{sys} = \frac{T_{NS}}{Y_2 - 1} \quad (9)$$

を得る。これは大気の吸収を含んでいないシステム雑音温度である。

- R-NS 法

P_{R+NS} と P_{NS} の比を Y_3 とすると

$$Y_3 = \frac{P_{R+NS}}{P_{NS}} = \frac{G\{T_{RX} + T_{amb} + T_{NS}\}}{G\{T_{RX} + T_{amb}\}}$$

となり、これから

$$T_{RX} = \frac{T_{NS}}{Y_3 - 1} - T_{amb} \quad (10)$$

を得る。この式により受信機雑音温度を算出することができる。

4 測定結果

測定日は 2011 年 12 月 20 日であり、以下の解析ではその日の気温を用いて $T_{amb}=284.5$ K を使用した。測定はアンテナの向く方位角 Az を 250° に固定した状態で仰角 El を 80° から 16° までの範囲で行った。この測定で得られた各状態におけるパワーとそこから計算されるシステム雑音温度 T_{sys}^* をまとめたものを表 1 に示す。

- T_{RX} 、 τ_0 の算出

大気の吸収量を含んだシステム雑音温度 T_{sys}^* は次式のように表すことができる。

$$T_{sys}^* = T_{sys}e^\tau = T_{RX}e^\tau + T_{amb}e^\tau - T_{amb} \quad (11)$$

この式を整理すると (ただし $\tau = \tau_0 \sec z$)

$$\begin{aligned} T_{sys}^* + T_{a,b} &= (T_{RX} + T_{amb})e^\tau \\ \log(T_{sys}^* + T_{amb}) &= \log(T_{RX} + T_{amb}) + \tau_0 \sec z \end{aligned} \quad (12)$$

上式において、縦軸に $\log(T_{sys}^* + T_{amb})$ をとり、横軸に $\sec z (=1/\sin(El))$ をとると、右辺の第一項 $\log(T_{RX} + T_{amb})$ は一次関数における切片、 τ_0 は傾きとなる。故に、表 1 で得ら

表 1 測定結果 (方位角 = 250°)

CH1(LHCP)						
仰角 [deg]	secz	R[dBm]	R+NS[dBm]	SKY[dBm]	SKY+NS[dBm]	T_{sys}^*
80	1.02	-1.110	-0.809	-6.325	-5.393	123.11
60	1.15	-1.086	-0.766	-6.234	-5.314	125.89
41.8	1.50	-1.097	-0.787	-6.034	-5.148	135.09
30	2.00	-1.102	-0.788	-5.748	-4.908	149.37
23.5	2.51	-1.077	-0.785	-5.502	-4.704	161.54
19.5	3.00	-1.070	-0.762	-5.285	-4.524	174.46
16	3.63	-1.072	-0.763	-5.029	-4.308	192.32
CH2(RHCP)						
仰角 [deg]	secz	R[dBm]	R+NS[dBm]	SKY[dBm]	SKY+NS[dBm]	T_{sys}^*
80.0	1.02	-2.087	-0.107	-7.692	-2.828	108.54
60.0	1.15	-2.079	-0.102	-7.597	-2.813	111.58
41.8	1.50	-2.088	-0.117	-7.372	-2.750	120.37
30.0	2.00	-2.081	-0.110	-7.059	-2.635	133.23
23.5	2.51	-2.094	-0.127	-6.782	-2.545	147.16
19.5	3.00	-2.071	-0.103	-6.555	-2.446	158.18
16.0	3.63	-2.073	-0.109	-6.270	-2.323	175.59

れたデータから縦軸に $\log(T_{sys}^* + T_{amb})$ 、横軸に $secz$ のグラフを作成し、得られる直線の傾きと切片から受信機雑音温度 T_{RX} および測定時の天頂での大気の光学的厚み τ_0 を算出できる。

上述の処理を行って得られた結果を図 2 および表 2 に示す。このように、 $secz$ を用いて τ_0 を測定するのでよく $secz$ 測定と呼ばれる。

表 2 フィッティング結果得られたパラメータ

	T_{RX} [K]	τ_0
CH1	98.93	0.060
CH2	85.25	0.060

- T_{NS} の算出

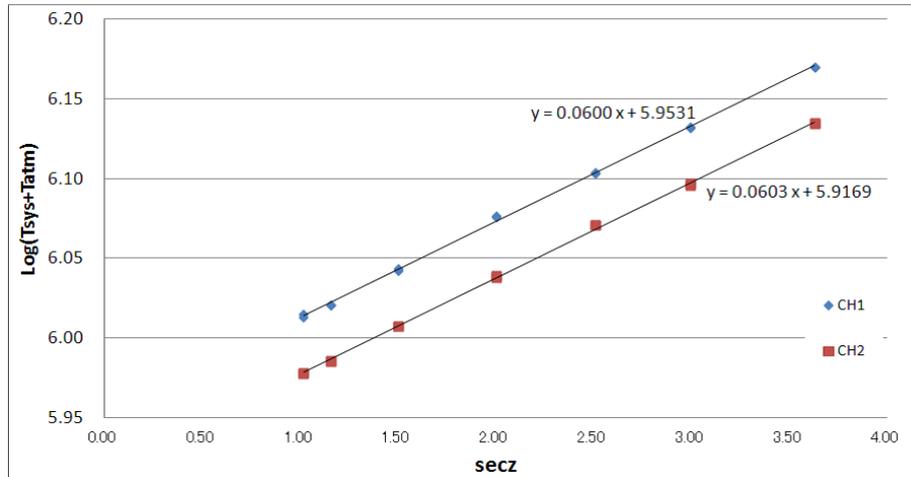


図2 フィッティング結果

R - NS法で示した式 10 を T_{NS} に関してまとめると次式のようになる。

$$T_{NS} = (T_{RX} + T_{amb})(Y_3 - 1) \quad (13)$$

この式に先ほどフィッティングから求めた T_{RX} を代入することでノイズソースの雑音温度 T_{NS} を算出することができる。その計算を行った結果を表 3 に示す。また、その T_{NS} の値を用いて NS法によって T_{sys} を求め、さらにその T_{sys} に先ほど求めた τ_0 を使って T_{sys}^* を算出した結果も合わせて示している。

この結果で得られた T_{sys}^* と R - s k y法から得られた T_{sys}^* を比較するとどちらのチャンネルでも 7 %以下で一致していた。よって今回算出したノイズソースの雑音温度を用いた NS法システム較正が十分可能であることが証明された。

- T_{NS} の安定性確認

今回のノイズソースの注入方法の場合、数ミリの挿入加減の変化でノイズソースの値が大きく変わってしまう。したがって、ノイズソース固定ホルダーを使用しているがノイズソースの雑音温度が安定しているかの確認を行う必要がある。

12月20日に一度 22GHz 帯観測システムの IF 部出力のリニアリティを改めて確認しアッテネータの値を調整した後、ノイズソースの雑音温度測定を行った。また1月5日にも同様の観測システムにて測定を行い、それぞれの測定結果を比較したものを表 4 に示す。両者の結果を比較すると、それぞれのチャンネルにおけるノイズソースの変化率は CH 1 (LHCP) で 7.6 %、CH2(RHCP) で 8.7 %であった。この約 2 週間における変動に関して観測時の気温の影響を受けていることも考えられるが、1 か月以上の長期観測を行う場合は定期的にノイズソースの雑音温度を測定することが望ましい。

表 3 ノイズソース雑音温度測定結果 (方位角 = 250 °)

CH1(LHCP)			
仰角 [deg]	T_{NS} [K]	T_{sys} [K]	T_{sys}^* [K]
80	27.58	115.19	122.43
60	29.48	124.95	133.92
41.8	28.48	125.77	137.62
30	28.91	135.39	152.66
23.5	26.77	132.67	154.22
19.5	28.34	147.86	176.99
16	28.34	157.04	195.25
CH2(RHCP)			
仰角 [deg]	T_{NS} [K]	T_{sys} [K]	T_{sys}^* [K]
80	214.44	103.86	110.41
60	214.03	106.53	114.21
41.8	213.29	112.34	122.98
30	213.23	120.48	135.93
23.5	212.69	128.69	149.70
19.5	212.82	135.06	161.81
16	212.29	143.30	178.35

表 4 ノイズソース雑音温度測定結果比較

測定日 (Y/M/D)	CH1(LHCP)		CH2(RHCP)		T_{amb} [K]
	T_{NS} [K]	σ	T_{NS} [K]	σ	
2011/12/20	28.27	1.11	213.26	0.86	286.0
2012/01/05	30.61	0.37	233.46	0.98	278.5