

8 GHz システム雑音温度測定

藤沢健太 (山口大学)

1. はじめに

山口 3.2 m 電波望遠鏡に 8 GHz 用導波管を設置されたので、受信機本来の性能が発揮されることになった。この受信機を含めたシステム雑音温度の測定を行ったので報告する。

2. 測定

2-1. 測定の概要

作業日時 9月12日 (木) 11:00~16:00

作業内容 システム雑音温度測定 (ノイズソース、R-Sky、大気放射温度測定)

作業者名 藤沢、田村

その他 プログラム追尾装置でスケジュールを読み込んで追尾する実験も行った
(別途報告予定)

2-2. 測定システム

ノイズソースの雑音温度を基準とするシステム雑音温度測定、R-Sky法によるシステム雑音温度測定の2つの方法を用いた。ノイズソースはクロスガイドカプラによって観測信号に重畳される。アブソーバはホーンの開口部を覆うように設置される。測定の概念図を図1に示す。

2-3. ノイズソースによるシステム雑音温度測定

2-3-1. 注入する雑音温度

現在はノイズソースが1個しかないため、各々のチャンネルのクロスガイドカプラに接続を変えて測定を行った。使用したノイズソースはアジレント346Cである。ENRを表1に示した。0.2 dB程度の周波数依存性があるが、測定を行った中心周波数8.3 GHzで代表することとして、 $ENR = 15.08$ dBを採用した。

クロスガイドカプラの結合係数は各チャンネルで測定されている。その値を表2に示す。測定を行った8.3 GHzの値として、CH1は21.1 dB、CH2は21.2 dBを採用した。

表1. ノイズソース346CのENR

周波数	ENR [dB]
7.0	14.78
8.0	14.99
9.0	15.29

表2. グロスガイドカプラの結合係数

周波数 [GHz]	結合係数C [dB]	
	CH1 (LHCP)	CH2 (RHCP)
8.0	21.1	21.2
8.5	21.0	21.2
9.0	21.2	21.4

クロスガイドカプラを通して注入される雑音温度 T_n は以下の式によって得られる：

$$T_{n0} = 290 \left(10^{\frac{ENR}{10}} + 1 \right) \cdot 10^{-\frac{C}{10}}$$

これはノイズソースがONの状態では注入されている雑音温度である。OFFの状態では常温（290K）が発生し、それがカプラによって注入され、システム雑音に寄与している（約3K）。ノイズソースONによって付加される雑音分から、OFF状態でシステム雑音に寄与している分をあらかじめ差し引いておく必要がある。したがって、ノイズソースのON/OFFによって発生する差に寄与する雑音温度は

$$T_n = 290 \cdot 10^{\frac{ENR-C}{10}}$$

である。CH1の T_n は72.51K、CH2は73.06Kとなる。これは既知の値である。システム雑音温度 T_{sys} は

$$T_{sys} = \frac{T_n}{10^{\frac{P_{on}-P_{off}}{10}} - 1}$$

として得られる。

2-3-2. 測定

測定は、方位角を140度固定、仰角を80、50、30、20、15、12、10、8、7、6、5度の各位置において測定した。また5度の測定後に再現性を調べるため80度で再度測定を行った。上記の角度でアンテナが安定した状態になったら、ノイズソースを約4秒間ONし、続けて4秒間OFFする。これを3回繰り返す。この間、ダウンコンバータ出力信号（100-500MHzのIF信号、E-O-U-T）を連続的にパワーメータ（アンリツ製ML2437A）で測定し、時刻データとともにファイルとして保存する。

この測定をCH1、2について行った。なお、測定した時間帯は、CH2が先で02：

45-03:15、CH1は04:32-04:54 (UT) である。測定日は一日中、雲が出ており、特にCH2の測定時には塊状の積雲が地平線近くまで覆っていた。CH1の測定時にも雲がかかっていたが、CH2の測定時と比較すると雲の分布は同様であった。

2-3-3. 結果

測定結果を表3 a (CH1)、b (CH2) に示す。表は、左から測定時刻、仰角 (度)、 $\sec z$ 、ノイズソースON時の測定パワー、同OFF時のパワー、ON-OFFの差 (dB)、システム雑音温度、ON-OFFの差 (mW) である。最後の項目は、ゲインが一定でシステムの直線性が保たれていれば常に一定値になるはずである。逆に、システムの安定性を調べる目安となる。測定の結果、CH1、2ともに約1%以内で一定値であり、システムが安定であり、直線性が保持されていることを示している。

システム雑音温度はCH1、2に分けて考察する。CH1のシステム雑音温度は41.7 K (仰角80度) から73.9 K (5度) の範囲に分布している。横軸に $\sec z$ 、縦軸にシステム雑音温度をプロットしたものが図2 a である。低仰角で大気の自己吸収と思われる飽和が見られるが、全般によい直線性を示している。

大気を単純な並行平板と仮定すると、システム雑音温度の大気吸収量 τ に対する依存性は次の式で表される：

$$T_{\text{sys}}(\tau) = T_{\text{sys0}} + T_{\text{atm}}(1 - e^{-\tau})$$

ここで T_{sys0} は大気の影響を含まないシステム雑音温度、 T_{atm} は大気の等価温度である。8 GHz での観測では τ は1より十分小さいと考えられるので、直線近似を行うと

$$\begin{aligned} T_{\text{sys}}(\tau) &= T_{\text{sys0}} + T_{\text{atm}}\tau \\ &= T_{\text{sys0}} + T_{\text{atm}}\tau_0 \sec(z) \end{aligned}$$

となる。ここで τ_0 は天頂での大気吸収量である。

CH1の測定で得られた結果にこのモデルを適用すると、 $T_{\text{sys0}} = 39.07 \text{ K}$ 、 $T_{\text{atm}}\tau_0 = 3.153 \text{ K}$ を得る。大気の等価温度を286 Kと仮定する (Altshuler 1968 を参考にした) と、 $\tau_0 = 0.0110$ を得る。これは8 GHzの結果として妥当な値である。

大気の影響を含まないシステム雑音温度に影響するのは、受信機雑音温度、給電部・導波管損失、ビーム伝送系損失、鏡面の抵抗損失、スピルオーバーによる大地の熱放射、宇宙背景放射である。既知の損失量などに基づいてシステム雑音温度の配分表を作成 (表3) した (CH2もあわせて示してある)。この計算値と実際に得られた測定値は2.1 Kの差であり、よい一致を示している。実測値のほうがやや高い値となっているのは、測定誤差によるものと、各損失項目の見積もり誤差が大きいと考えられる。測定誤差についてはR

— S k y法でクロスチェックを行った（後述）。また、損失の見積もり誤差が大きいと考えられるビーム伝送系については、付着した鳩の糞を掃除して再度測定を行うことを検討している。

CH 2 の測定は、特に低仰角で雲の影響を強く受けたため、測定値がばらついている。高仰角のデータに着目すると、大気を含まないシステム雑音温度は約 4 1 K となる。これは CH 1 の 3 9 K とほぼ同じ結果である。

表 3 a . 測定結果 (CH 1)

Time	El	sec z	Pon [dB]	Poff [dB]	On-Off [dB]	Tsys [K]	Pn-Poff
4:32	80	1.015	-15.484	-19.858	4.374	41.73	0.01796
	80	1.015	-15.484	-19.858	4.374	41.73	0.01796
	80	1.015	-15.484	-19.855	4.371	41.77	0.01795
4:35	50	1.305	-15.425	-19.736	4.311	42.69	0.01805
	50	1.305	-15.425	-19.736	4.311	42.69	0.01805
	50	1.305	-15.426	-19.733	4.307	42.76	0.01803
4:37	30	2.000	-15.336	-19.5	4.164	45.08	0.01805
	30	2.000	-15.339	-19.502	4.163	45.09	0.01803
	30	2.000	-15.341	-19.505	4.164	45.08	0.01803
4:39	20	2.924	-15.228	-19.209	3.981	48.31	0.01801
	20	2.924	-15.231	-19.214	3.983	48.27	0.018
	20	2.924	-15.231	-19.216	3.985	48.24	0.01801
4:41	15	3.864	-15.115	-18.926	3.811	51.61	0.01799
	15	3.864	-15.116	-18.925	3.809	51.65	0.01798
	15	3.864	-15.116	-18.925	3.809	51.65	0.01798
4:42	12	4.810	-14.978	-18.613	3.635	55.38	0.01802
	12	4.810	-14.981	-18.614	3.633	55.42	0.018
	12	4.810	-14.981	-18.611	3.63	55.49	0.01799
4:43	10	5.759	-14.907	-18.44	3.533	57.74	0.01799
	10	5.759	-14.91	-18.44	3.53	57.81	0.01796
	10	5.759	-14.908	-18.44	3.532	57.76	0.01798
4:44	8	7.185	-14.744	-18.091	3.347	62.44	0.01802
	8	7.185	-14.742	-18.087	3.345	62.5	0.01802
	8	7.185	-14.743	-18.084	3.341	62.6	0.01801
4:45	7	8.206	-14.624	-17.841	3.217	66.07	0.01804
	7	8.206	-14.619	-17.835	3.216	66.1	0.01806
	7	8.206	-14.615	-17.828	3.213	66.19	0.01806
4:46	6	9.567	-14.53	-17.668	3.138	68.43	0.01813
	6	9.567	-14.529	-17.666	3.137	68.46	0.01813
	6	9.567	-14.526	-17.664	3.138	68.43	0.01815
4:47	5	11.474	-14.345	-17.315	2.97	73.87	0.01821
	5	11.474	-14.344	-17.314	2.97	73.87	0.01822
	5	11.474	-14.342	-17.313	2.971	73.84	0.01823
4:53	80	1.015	-15.461	-19.842	4.381	41.62	0.01807
	80	1.015	-15.462	-19.843	4.381	41.62	0.01806
	80	1.015	-15.467	-19.846	4.379	41.65	0.01804

表 3 b. 測定結果 (CH 2)

Time	El	sec z	Pon [dB]	Poff [dB]	On-Off [dB]	Tsys [K]	Pn-Poff
2:51	80	1.015	-17.856	-22.025	4.169	45.33	0.01011
	80	1.015	-17.855	-22.025	4.17	45.32	0.01011
	80	1.015	-17.857	-22.026	4.169	45.33	0.01011
2:46	50	1.305	-17.774	-21.862	4.088	46.73	0.01018
	50	1.305	-17.776	-21.865	4.089	46.72	0.01018
2:56	30	2.000	-17.699	-21.668	3.969	48.9	0.01018
	30	2.000	-17.7	-21.671	3.971	48.86	0.01018
	30	2.000	-17.702	-21.668	3.966	48.96	0.01016
2:59	20	2.924	-17.538	-21.329	3.791	52.41	0.01026
	20	2.924	-17.538	-21.327	3.789	52.46	0.01026
	20	2.924	-17.531	-21.293	3.762	53.02	0.01023
3:00	15	3.864	-17.302	-20.811	3.509	58.76	0.01032
	15	3.864	-17.314	-20.808	3.494	59.13	0.01026
	15	3.864	-17.309	-20.816	3.507	58.81	0.0103
3:02	12	4.810	-17.181	-20.539	3.358	62.62	0.01031
	12	4.810	-17.194	-20.56	3.366	62.41	0.01029
	12	4.810	-17.196	-20.563	3.367	62.38	0.01029
3:03	10	5.759	-17.007	-20.159	3.152	68.51	0.01028
	10	5.759	-17.005	-20.167	3.162	68.21	0.01031
	10	5.759	-17.017	-20.178	3.161	68.24	0.01028
3:04	8	7.185	-17.053	-20.232	3.179	67.7	0.01023
	8	7.185	-17.045	-20.228	3.183	67.58	0.01026
	8	7.185	-17.045	-20.226	3.181	67.64	0.01025
3:08	7	8.206	-16.915	-19.936	3.021	72.7	0.0102
	7	8.206	-16.916	-19.936	3.02	72.73	0.01019
	7	8.206	-16.918	-19.938	3.02	72.73	0.01019
3:06	6	9.567	-17.011	-20.151	3.14	68.88	0.01024
	6	9.567	-17.011	-20.15	3.139	68.91	0.01024
	6	9.567	-17.011	-20.149	3.138	68.94	0.01024
3:07	5	11.474	-16.734	-19.597	2.863	78.28	0.01024
	5	11.474	-16.735	-19.601	2.866	78.17	0.01025
	5	11.474	-16.737	-19.604	2.867	78.13	0.01024
3:14	80	1.015	-17.801	-21.936	4.135	45.91	0.01019
	80	1.015	-17.801	-21.954	4.153	45.61	0.01022
	80	1.015	-17.795	-21.949	4.154	45.59	0.01023

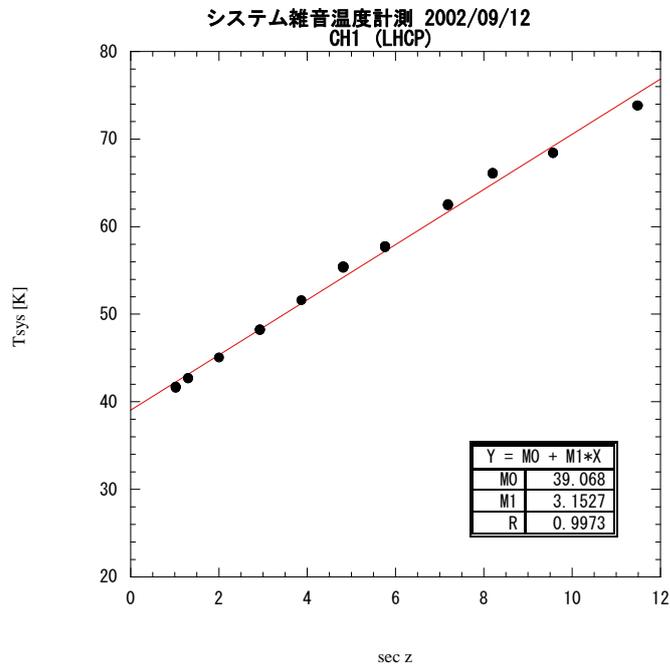


図 2 a. ノイズソースによるシステム雑音温度測定結果 (CH1、LHCP)

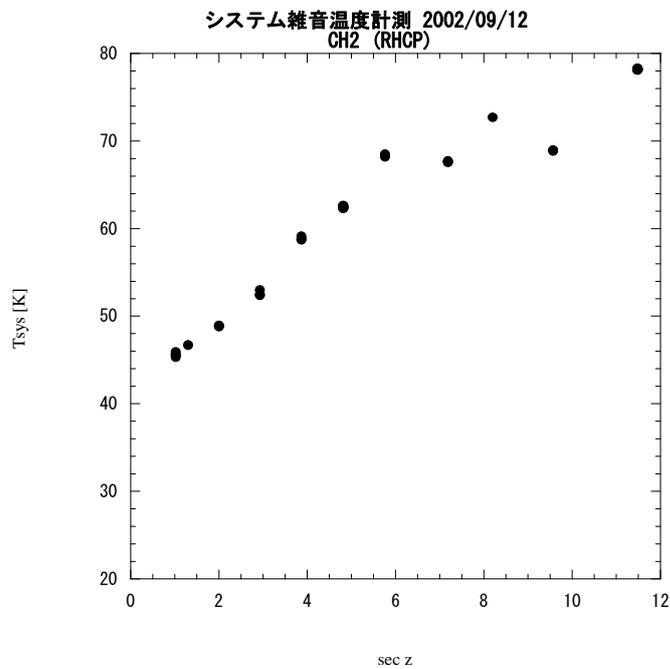


図 2 b. ノイズソースによるシステム雑音温度測定結果 (CH2、RHCP)

表 3. システム雑音温度の分配表

項目	CH1 (LHCP)		CH2 (RHCP)	
	損失 [dB]	雑音温度 [K]	損失 [dB]	雑音温度 [K]
受信機雑音				
検査成績書	—	1.2	—	1.4
日本通信機 (H14)				
給電部損失				
8 GHz 帯給電装置				
工場検査成績書	0.09	6.0	0.14	9.3
三菱電機 (H13)				
導波管損失				
添付資料 1	0.15	9.9	0.11	7.3
日本通信機 (H14)				
ビーム伝送系損失				
推定値	0.1	6.7	0.1	6.7
主鏡面スピルオーバー				
TTC&MIOT 用地球局設備				
現地検査成績書	0.01	0.7	0.01	0.7
三菱電機 (S54)				
宇宙背景放射	—	2.7	—	2.7
計算値合計		37.0		41.7
測定値		39.1		41*
計算値との差		+2.1		-1

*図 2 b から推定した値

3. R-Sky によるシステム雑音温度測定

常温電波吸収体 (アブソーバ) を使用してシステム雑音温度を測定した。この方法は物理温度を基準とすることが利点であるが、大気の等価温度をアブソーバの物理温度と等しいと仮定すること、大気による吸収量が含まれたシステム雑音温度が測定結果になることという問題点がある。

測定は、方位角を 140 度、仰角を 80 度に固定して行った。アブソーバでホーン上面の開口部を覆った状態 (R) と外した状態 (Sky) で出力パワーを測定した。またアブソーバ覆った状態でノイズソースを ON (R+NS) / OFF (NS) した。この測定を CH1、2 についてそれぞれ行った。アブソーバの雑音温度 T_R = 大気の等価温度 = 300

Kと仮定すると、大気吸収量を含むシステム雑音温度 T_{sys}^* は

$$T_{sys}^* = \frac{T_R}{10^{\frac{P_R - P_{sky}}{10}} - 1}$$

として得られる。なお、大気吸収量を含むシステム雑音温度 T_{sys}^* と通常のシステム雑音温度

T_{sys} の間には、

$$T_{sys}^* = T_{sys} e^{\tau}$$

の関係がある。

測定結果を表4に示す。R-Sky法によるシステム雑音温度はCH1で43.29K、CH2では46.58Kとなった。

この結果をノイズソースによる測定結果と比較する。仰角80度における大気吸収量を $\tau_0 = 0.0110$ によって $\tau = \tau_0 \sec(10^\circ) = 0.0112$ とすると、ノイズソースによる測定結果

(CH1: 41.93K、CH2: 46.07K)から推定される T_{sys}^* は、それぞれ42.40K、46.59Kとなる。したがって、ノイズソースによる測定とR-Sky法による測定結果は誤差1K以下で一致している。

一方、R状態でノイズソースをONにすると、ノイズソースのパワーが約5%大きく測定された。これは測定システムの非直線性を示している。また、出力が大きい状態でパワーが大きく測定されていることから、アンプの飽和による非直線性ではない。パワーメータの非直線性である可能性が考えられる。今後の検討項目である。

この非直線性を無視して、R状態でノイズソースによるシステム雑音温度を測定した結果、CH1、2でそれぞれ315.7K、326.90Kとなった。これからアブソーバの物理温度300Kを引くと受信機単体の雑音温度が得られる。その結果、15.67K、26.90Kを得た。これは工場試験成績書の値に近いが、大きな値の差から小さい値を推定しているため誤差が大きいと考えられる。

表 4. R-Sky法によるシステム雑音温度測定

状態・項目	測定結果		コメント
	CH1	CH2	
R	-10.812	-13.277	
Sky	-19.803	-21.993	
R-Sky	8.993	8.716	
R-Skyによる T_{sys}^*	43.29K	46.58K	R-SkyとNSによる測定で よい一致を示している
NSの測定による T_{sys}^*	42.40K	46.59K	
R+NS	-9.914	-12.401	NSによるパワーが、R状態で は約5%大きく測定されている
NS	-15.442	-17.867	
Sky-NSによる T_{sys}	41.93K	46.07K	2章と同内容、再現している
R状態でNSによる T_{sys}	315.67K	326.90K	
$T_{rx} = T_{sys} - 300K$	15.67K	26.90K	誤差が大きいと考えられる

測定時刻=05:02、Az=140度、El=80度

4. 結果のまとめ

8GHz用導波管を設置した状態でシステム雑音温度の測定を行った。測定はノイズソースを基準にする方法とR-Sky法を併用し、クロスチェックを行った。2つの測定結果は1K以下の精度で一致し、信頼できる値である事が示された。大気を含まないシステム雑音温度はCH1(LHCP)が約39K、CH2(RHCP)が約41Kであった。これらの値は、受信機雑音温度およびアンテナ、導波路の損失などから推定される値と2K以下の精度で一致している。今後はビーム伝送系に付着した鳩の糞を掃除して再度測定を行うことが必要であると考えている。また、強度が既知でビームに対して十分小さい天体を用いてアンテナの開口能率を測定し、G/Tとしてアンテナの総合的な性能を調べる事が必要である。

添付資料1 Xバンドカップラ及びバンド特性.doc (日本通信機)

添付資料2. Xバンドフレキ特性.doc (日本通信機)

添付資料3. Xバンド受信機雑音温度 (日本通信機)

==以上==