Um radiômetro criogênico para observações rádio-astronômicas na banda K

J. W. S. Vilas-Boas[1], Y. Bakor[1], R. E. Schaal[1], R. Y. Hadano

CRAAE (INPE, USP, UNICAMP, MACKENZIE)

[1] - *EPUSP/PTR/CRAAE, C.P. 61548, São Paulo, SP, 05424-970, Brasil*

Contato por E-mail: jboas@spidcr.usp.br ou boas@das.inpe.br.

Recebido em 29 de novembro, 1995

A cryogenic radioímeter operating in the 21.7 GHz to 24.1 GHz high frequency band was assembled at the Itapetinga Radio Observatory for radio astronomical observations. It is formed by two independent channels operating at the right (R) and left (L) circular polarization with average noise temperature smaller than 100 K in both polarization modes. Average system temperature of 150 K is estimated, assuming the optical depth of the sky at these frequencies equal to 0.1 and the sources located at elevations above 40 degrees. The radiometer has sensitivity 10 times larger than the radiometer presentely being used at the Itapetinga 13.7 m telescope and represents the state of art in cryogenic radiometer for radio astronomy researches.

Um radiômetro criogênico para operar na faixa de 21,7 GHz a 24,1 GHz, foi montado para observações rádio astronômicas no Rádio Observatório do Itapetinga. O radiômetro é constituído de dois canais independentes que operam nos modos de polarização circular à direita e à esquerda com temperatura de ruído inferior a 100 K. Para opacidade atmosférica da ordem de 0,1 e elevações superiores a 40 graus a temperatura de sistema é da ordem de 150 K o que implica em uma sensibilidade 10 vezes maior do que a sensibilidade dos radiômetros usados anteriormente neste observatório. Este sistema representa o estado da arte em radiômetro para pesquisas rádio-astronômicas.

I. Introdução

Desde sua instalação em 1971[1], O Rádio Telescópio de 13,7 m do Itapetinga é amplamente utilizado na pesquisa de rádio emissões de fontes galácticas e extra-galáticas bem como no estudo de emissões moleculares provenientes de nuvens associadas a envelopes de estrelas velhas e a regiões de formação de estrelasl[2−8] Dentre essas, destacam-se as transições $6_{16} \rightarrow 5_{23}$ (22,235 GHz) da molécula de água (H_2O) e as transições $J : 1 \rightarrow 0$ (v=0,1) (43,423 GHz e 43,122 GHz) da molécula de monóxido de silício (SiO), cujas emissões são estimuladas por radiação (MASER). Estas emissões se caracterizam por serem muito intensas e provenientes de regiões com dimensões inferiores a 10^{15} cm. No início dos anos 80, foram realizadas observações de emissões térmicas do amoníaco e de linhas de recombinação[9−12], utilizando-se um radiômetro criogênico com amplificador utilizando o processo MASER, que representava o estado da arte no final da década de 70[13]. Devido ao alto custo das operações, este sistema foi desativado. Estes radiômetros pararam de ser produzidos com o surgimento da nova geração de radiômetros e amplificadores refrigeráveis[14,15] utilizando conversores e amplificadores a transistor, mantidos a 20 K em um sistema refrigerado a hélio.

A partir de 1982, o único receptor disponível no Itapetinga para espectroscopia molecular, operando basicamente em 22.2 GHz, era um radiômetro tendo como primeiro estágio de RF um misturador de baixo ruído.

Este radiômetro operando a temperatura ambiente e sem rejeição de imagem, apresentava temperatura de ruído da ordem de 2000 K e banda de sintonia de 21.7 GHz a 23.5 GHz. Com esta temperatura de ruído, o sistema requer integrações longas para se detectar sinais de alguns graus Kelvin, restringindo as pesquisas rádio-astronômicas a fontes de alta intensidade. Este é o caso de fontes como o Sol[16] e as fontes de vapor de água e monóxido de silício observadas no Itapetinga desde 1982.

As pesquisas sobre os amplificadores a transistor refrigerados, mostraram que radiômetros de altíssima sensibilidade e baixo custo operacional poderiam ser construídos para aplicações em rádio-astronomia[17]. O Rádio Observatório Nacional Americano (NRAO) iniciou a construção de uma série de unidades desses amplificadores para equipar os radiômetros a serem utilizados nas antenas da rede VLBA (Very Long Base-Line Array). Através de negociação com o NRAO, foi possível adquirir um amplificador criogênico, a partir do qual foi montado um radiômetro operando na faixa de freqüências compreendida entre 21,7 GHz e 24,2 GHz. Este radiômetro apresenta temperatura de ruído da ordem de 95 K e temperaturas de sistema da ordem 150 K a 200 K foram estimadas.

Na seção 2 deste artigo, é descrito o radiômetro e apresentado um diagrama de blocos indicando os diversos estágios. Os testes realizados são apresentados e discutidos na seção 3 e as conclusões são apresentadas na seção 4.

2. Radiômetro

O diagrama de blocos do receptor está mostrado na Figura 1. Após o polarizador o sinal de alta freqüência (RF) é separado em dois canais de polarizações circular à direita (R) e à esquerda (L). Existe um circuito independente para cada polarização, de modo que as duas saídas para os analisadores espectrais acusto-ópticos, (AOS) correspondem a dois radiômetros independentes. Essas saídas podem ser sintonizadas para observações simultâneas na mesma freqüência ou em freqüências diferentes. A diferença máxima da freqüência de sintonia entre os dois canais é da ordem de 50 MHz. Consequentemente, não se pode observar simultaneamente as transições $6_{16} \rightarrow 5_{23}$ de H_2O e a inversão rotacional do nível meta-estável (J,K) = (3,3) de NH_3. Observação com os dois radiômetros sintonizados na mesma freqüência implica em se ganhar 40% no tempo de integração quando é feita a média dos sinais observados nas duas polarizações. Este fator é relevante especialmente quando a intensidade das fontes que se está pesquisando é muito baixa e integrações longas são necessárias.

Uma terceira saída derivada do canal de polarização R é detectada quadraticamente para obtenção do sinal de contínuo cuja banda instantânea é da ordem de 700 MHz. Na figura 1 esta saída vai para o CONTÍNUO. Saída similar também pode ser construída para o canal L.

A linha pontilhada delimita a parte refrigerada. Neste ambiente, as temperaturas dos amplificadores de RF e do polarizador é da ordem de 20 K. A "caixa" denominada UNIDADE NRAO, foi montada nos laboratórios de eletrônica do National Radio Astronomical Observatory (NRAO, USA). O resto do radiômetro, construído com componentes adquiridos no mercado, foi projetado no CRAAE. Alguns estágios foram testados no Laboratório de Micro-Eletrônica (LME) da Escola Politécnica da USP e o sistema como um todo foi integrado no Radio Observatório do Itapetinga.

Na figura 1, junto a alguns dos componentes são fornecidas informações sobre as fontes de alimentação, freqüência em que parte do circuito opera, ganho dos amplificadores, etc.

A corneta para este radiômetro foi construída a partir de um projeto desenvolvido pelos engenheiros do Rádio-Observatório de Yebes, Espanha, para operar em 43 GHz. Este projeto é parte de um outro radiômetro que se encontra em fase de construção no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) em São José dos Campos[18]. A corneta de 22 GHz é uma cópia homotética da corneta de 43 GHz e foi desenhada e desenvolvida no laboratório de mecânica do INPE. Ela é equipada com uma "lente" de teflon para correção de

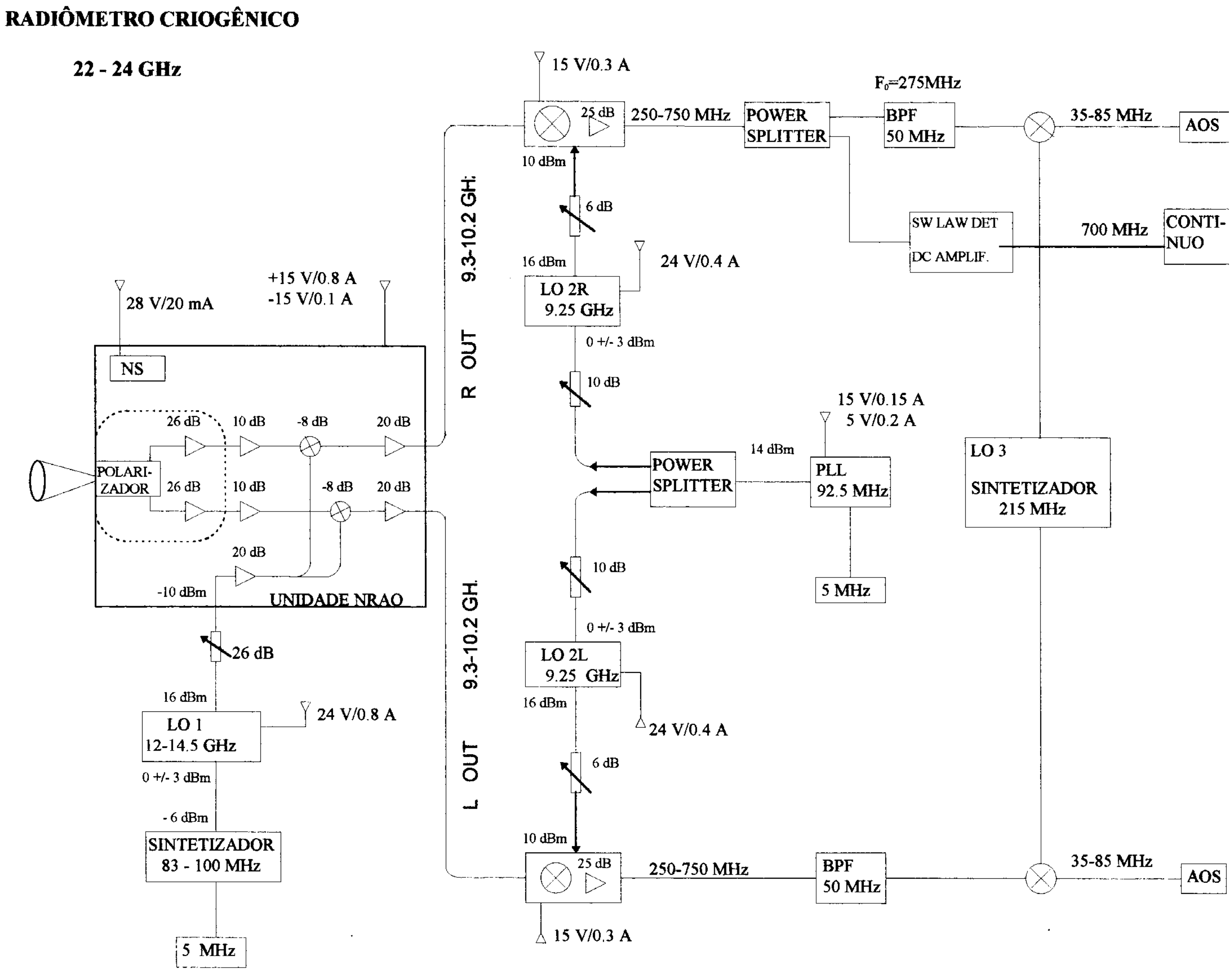

Figura 1. Diagrama esquemático do radiômetro criogênico. R e L indicam os canais de polarizações circular a direita e esquerda, respectivamente.

fase.

3. Resultados e Discussão

Neste item serão apresentados e discutidos o resultado dos testes do radiômetro refrigerado. Também serão apresentados os resultados preliminares com o radiômetro na temperatura ambiente e sem a corneta.

3.1 Radiômetro refrigerado

Para se determinar as características de um radiômetro são necessárias "fontes" de radiação ou corpos negros com temperaturas bem conhecidas A partir da observação destes corpos negros é possível estabelecer uma relação entre a temperatura da fonte de radiação e a tensão de saída do detetor quadrático. Desta forma se obtém uma relação Kelvin/Volts com a qual se determina a temperatura equivalente de qualquer fonte de radiação cuja emissão possa ser detectada com o radiotelescopio. Assim, utilizando-se duas fontes de radiação com temperaturas bem conhecidas, foram realizados vários testes para estimar a temperatura de ruído do radiômetro e a temperatura da fonte de ruído interna acoplada na entrada do radiômetro. Alguns resultados estão mostrados na Tabela 1. Na coluna 1 são fornecidas as frequências centrais de sintonia do radiômetro. Nas colunas 2, 3, 4 e 5 são dadas as voltagens de saída do detetor quadrático com o radiômetro nas seguintes condições, respectivamente:

(a) medindo um corpo negro na temperatura ambiente (carga quente CQ), colocado na frente da corneta.

(b) medindo o acréscimo de sinal, em relação à carga quente, gerado pela fonte de ruido.

(c) medindo um corpo negro mergulhado em nitrogênio líquido (carga fria CF) colocada na frente da corneta.

(d) medindo o acréscimo de sinal, em relação à carga fria, gerado pela fonte de ruído. Nas colunas 6 e 7 são dadas as temperaturas do radiômetro e da fonte de ruído. Finalmente, na coluna 8 é indicada a polarização na qual foram feitas as medidas. Na Figura 2 estão graficadas as temperaturas de ruído do radiômetro em função da freqüência para as saídas de polarização circular R e L. Na figura 3 estão indicadas as temperaturas da fonte de ruído medidas nas duas polarizações. Cada ponto é uma média aritmética das temperaturas medidas em relação às cargas quente (CQ) e fria (CF)

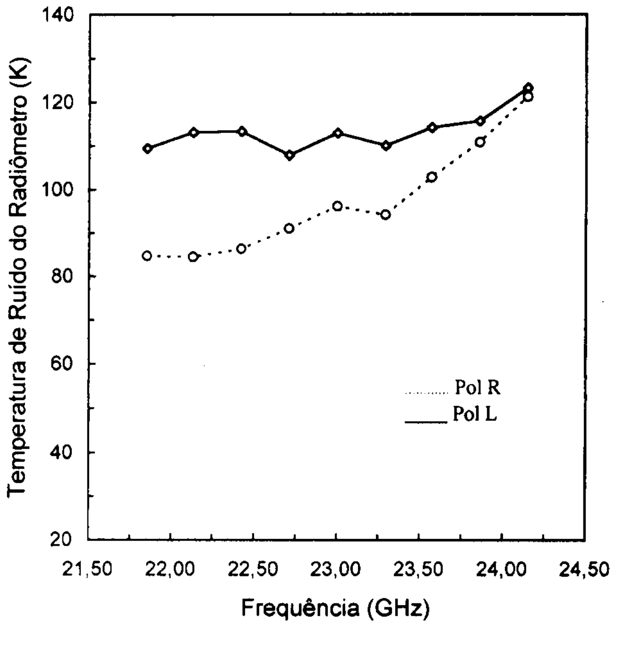

Figura 2. Temperatura do radiômetro em função da freqüência para os canais de polarização circular à direita (R) e à esquerda (L). Estas temperaturas foram medidas tomando-se como referência uma carga à temperatura de 295 K e uma carga a 77 K (nitrogênio líquido) colocadas na frente da corneta. Durante esses testes a temperatura dos amplificadores de alta freqüência era de 35 K a 40 K.

A temperatura do radiômetro foi calculada através da equação

$$T_{RAD_J} = \frac{(T_{CQ} - T_{CF})(V_{RAD_j} + V_{DC})}{V_{CQ_j} - V_{CF_j}} - T_{CQ} \quad (1)$$

onde o índice j indica o modo de polarização, T_{CQ} e T_{CF} são as temperaturas das cargas quente e fria e V_{CQ_j} e V_{CF_j} são as respectivas voltagens. V_{RAD_j} e V_{DC} são as voltagens correspondentes ao ruído do receptor e ao nível DC na saída do detetor quadrático com o sinal de entrada totalmente atenuado. A carga quente é uma espuma impregnada com carvão (absorver) à temperatura ambiente (295 K) e a carga fria é um "absorver" à temperatura do nitrogênio líquido (77 K). T_{RAD_J} é a temperatura equivalente de ruído do radiômetro.

Os resultados indicam que as temperaturas de radiômetro na polarização R são menores do que L, particularmente em freqüências inferiores a 23,5 GHZ. A maior diferença, da ordem de 20 K, é medida em 21,75 GHZ enquanto que temperaturas aproximadamente iguais são medidas acima de 23,7 GHZ. Este resultado indica que o receptor operando no modo de polarizaçao R tem melhor desempenho, especialmente em freqüências abaixo de 23,5 GHZ.

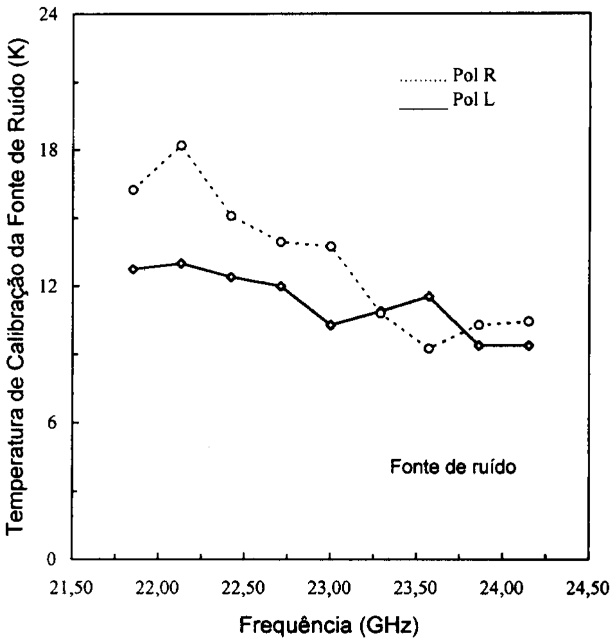

Figura 3. Temperatura de calibração da fonte de ruído em função da freqüência para os canais de polarização circular à direita (R) e à esquerda (L).

A figura 3 mostra que as temperaturas de calibração da fonte de ruído variam de freqüência para freqüência. Estas variações não resultam de incertezas nas medidas; elas resultam de diferenças de acoplamento entre a fonte de ruído e o canal de entrada do radiômetro. Outras

TABELA 1 - Resultado dos Testes do Receptor Refrigerado

Frequência (GHz)	Carga Quente (Volts)	Fonte de Ruído (Volts)	Carga Fria (Volts)	Fonte de Ruído* (Volts)	T_{RAD} (K)	T_{NT} (K)	Polarização
21.85	0.724	0.757	0.323	0.353	109	13	Pol. L
22.13	1.886	1.975	0.868	0.958	113	13	Pol. L
22.42	2.464	2.566	1.138	1.228	113	12	Pol. L
22.71	1.490	1.548	0.673	0.726	108	12	Pol. L
23.00	3.480	3.600	1.610	1.740	113	10	Pol. L
23.29	2.522	2.591	1.154	1.223	110	11	Pol. L
23.57	2.706	2.772	1.254	1.321	114	12	Pol. L
23.86	2.512	2.578	1.168	1.234	116	9	Pol. L
24.15	2.367	2.424	1.123	1.190	123	9	Pol. L
21.85	0.538	0.557	0.218	0.238	85	16	Pol. R
22.13	1.540	1.592	0.644	0.703	85	18	Pol. R
22.42	1.362	1.407	0.572	0.620	86	15	Pol. R
22.71	0.784	0.810	0.330	0.356	91	14	Pol. R
23.00	1.658	1.705	0.723	0.770	96	14	Pol. R
23.29	1.664	1.711	0.721	0.771	94	11	Pol. R
23.57	1.429	1.473	0.635	0.680	103	9	Pol. R
23.86	1.384	1.418	0.630	0.663	111	10	Pol. R
24.15	1.267	1.297	0.593	0.623	121	10	Pol. R

Nota: Estes resultados foram obtidos com os amplificadores de alta frequência a 40 K. A temperatura da fonte de ruído é uma média dos valores estimados em relação às cargas fria e quente. O asterisco indica medidas em relação à carga fria.

medidas da fonte de ruído, com o receptor operando à temperatura ambiente, mostram resultados similares.

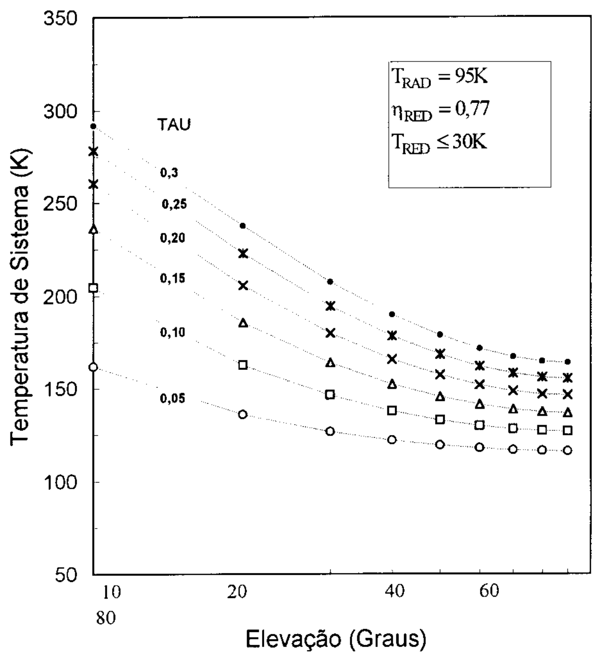

Figura 4. Temperatura de sistema versus a elevação para diferentes valores de opacidade atmosférica (TAU). No canto superior direito são dadas a temperatura de ruído do radiômetro (T_{RAD}), a transparência da redoma (η_{RED}) e a temperatura da redoma (T_{RED}) usadas no cálculo da temperatura de sistema.

Na figura 4 estão indicadas as temperaturas de sistema estimadas em função da elevação para diferentes valores da opacidade atmosférica. A opacidade corresponde a atenuação atmosférica estimada na direção do zênite. Supondo um modelo plano paralelo para a atmosfera, a temperatura de sistema foi calculada através da equação

$$T_{SYS} = T_{RAD} + Y_{RED} + T_{CEU}\eta_{RED}(1 - e^{-\tau\ sec(90-E)}) \tag{2}$$

fazendo-se a elevação (E) variar entre 0 e 90 graus. Para estes cálculos utilizou-se 95 K para a temperatura do radiômetro e 77% para a transparência da redoma em toda a banda de frequência. A temperatura de redoma, da ordem de 30 K, foi estimada a partir das perdas resistivas da redoma (-0.5 db) e assumindo a temperatura ambiente 300 K. Na realidade este é um limite superior deste parâmetro.

Um valor típico da profundidade óptica atmosférica em 22 GHz, no Itapetinga, durante os meses de inverno é 0,1. Para estes valores a temperatura de sistema em elevações acima de 40 graus é da ordem de 150 K. Esta temperatura implica em uma sensibilidade 10 vezes menor do que o receptor convencional em temperatura ambiente. O valor de T_{RAD} utilizado acima é uma média dos 36 valores mostrados nas tabelas 1 e 2.

Também foram realizados alguns testes do radiômetro sem corneta e em diferentes datas. O principal objetivos desta série de testes era verificar o desempenho do sistema criogênico. Como conseqüência, foi possível verificar a estabilidade do radiômetro e determinar as temperaturas de ruído do radiômetro e da fonte de ruído. Os resultados são fornecidos na tabela 2. Na figura 5 são dadas as temperaturas de radiômetro em função da freqüência. Os resultados também mostram que o radiômetro tem menor temperatura de ruído na polarização R do que em L O intervalo de freqüências mostrado nas figuras anteriores (21,7 GHz a 24,1 GHz) corresponde à banda de sintonia de alta freqüência do radiômetro.

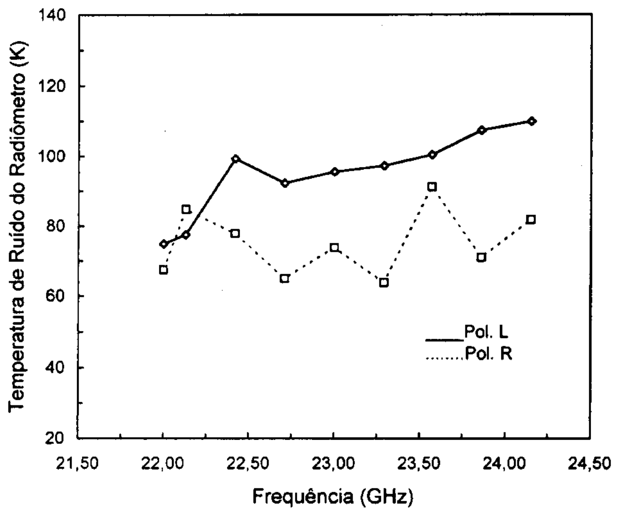

Figura 5. Temperatura do radiômetro em função da freqüência para os canais R e L. Essas temperaturas foram medidas com o radiômetro sem corneta e os amplificadores de alta freqüência à temperatura de 24 K.

3.2 Radiômetro na temperatura ambiente

Também foram realizados testes do radiômetro operando à temperatura ambiente. O objetivo destes testes era verificar o comportamento dos diversos componentes do sistema e estimar a temperatura de ruído do radiômetro não refrigerado. Os resultados dos testes estão mostrados na figura 6, onde são dadas as temperaturas do radiômetro em função da freqüência. Os resultados indicam que a temperatura do radiômetro varia entre 300 K e 600 K em 21,7 GHz e 24,1 GHz, respectivamente. Mesmo operando em temperatura ambiente, ele apresenta temperatura de ruído aproximadamente 4 vezes inferior aos radiômetros disponíveis no Rádio Observatório do Itapetinga.

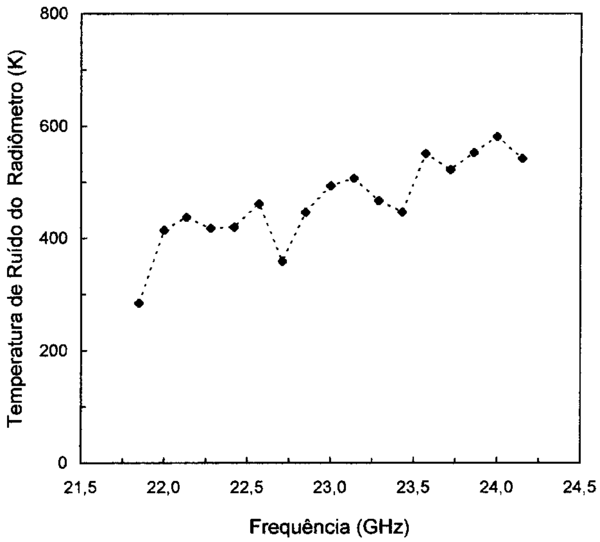

Figura 6. Temperatura do radiômetro versus freqüência para o sistema operando à temperatura ambiente (295 K).

Em todos os testes mencionados acima, o sinal de saída do detetor quadrático foi analisado para se verificar a estabilidade do radiômetro.

4. Conclusão

A partir dos testes do radiômetro criogênico para a banda K, realizados em diferentes períodos, pode-se concluir que:

a - o radiômetro criogênico é formado de dois canais independentes com banda de sintonia de alta freqüência entre 21,7 GHz e 24,1 GHz e banda instantânea de 700 MHz

b - o radiômetro tem temperatura de ruído variando entre 80 K e 130 K com valor médio da ordem de 95 K+16 K. Esta média foi obtida a partir de todas as temperaturas de 10 ruído estimadas na banda de sintonia de alta freqüência.

c - para as condições atmosféricas típicas no Radio-Observatório do Itapetinga durante os meses do inverno (tau=0,1), a temperatura de sistema é da ordem de 150 K acima de 40 graus de elevação.

Devido à baixa figura de ruído deste radiômetro estima-se grande redução no tempo de integração para se atingir o limite de sensibilidade. Por exemplo, uma

TABELA 2 - Resultado dos Testes do Radiômetro Refrigerado sem Corneta.

Frequência (GHz)	Carga Quente (Volts)	Fonte de Ruído (Volts)	Carga Fria (Volts)	Fonte de Ruído* (Volts)	T_{RAD} (K)	T_{NT} (K)	Polarização
22,00	3,880	0,557	-4,300	0,238	75	16	Pol. L
22,13	3,580	1,592	-4,350	0,703	77	18	Pol. L
22,42	2,500	1,407	-4,400	0,620	99	15	Pol. L
22,71	3,720	0,810	-3,890	0,356	92	14	Pol. L
23,00	4,850	1,705	-3,350	0,770	96	14	Pol. L
23,29	4,350	1,711	-3,530	0,771	97	11	Pol. L
23,57	6,690	1,473	-2,400	0,680	100	9	Pol. L
23,86	5,400	1,418	-2,800	0,663	108	10	Pol. L
24,15	3,150	1,297	-3,680	0,623	110	10	Pol. L
22,00	4,380	0,757	-4,480	0,353	67	13	Pol. R
22,13	3,270	1,975	-4,560	0,958	85	13	Pol. R
22,42	3,110	2,566	-4,760	1,228	78	12	Pol. R
22,71	0,680	1,548	-5,950	0,726	65	12	Pol. R
23,00	3,570	3,600	-4,640	1,740	74	10	Pol. R
23,29	4,340	2,591	-4,620	1,223	64	11	Pol. R
23,57	4,650	2,772	-3,800	1,321	91	12	Pol. R
23,86	1,310	2,578	-5,700	1,234	71	9	Pol. R
24,15	1,800	-5,160	-5,160	1,190	82	9	Pol. R

Nota: Testes realizados com a unidade criogênica a 24 K. O asterisco indica medidas em relação a carga fria.

rádio-fonte detectada em 10 minutos de integração com o novo radiômetro, necessitaria 2 horas e 10 minutos de integração com o radiômetro antigo. Desta forma, equipado com este radiômetro, o Rádio-Observatório do Itapetinga estará apto a realizar espectroscopia molecular de alta sensibilidade e fornecerá importantes informações para uma melhor compreensão da física das nuvens moleculares e das regiões de formação de estrelas. Resultados igualmente importantes podem ser obtidos a partir de observações no contínuo de quasares e rádio-galáxias.

Pelo seu desempenho, o novo radiômetro representa o estado da arte em instrumentação para pesquisas em rádio astronomia.

Agradecimentos

Os autores agradecem aos Drs. Kleber Cunha Pinto do laboratório de micro-eletrônica da Escola Politécnica (LME), pela ajuda na montagem e testes dos filtros passa banda para supressão de ruído, ao Dr Eugênio Scalise Jr. e ao Laboratório de Mecânica do INPE, São José dos Campos, pela confecção da corneta e por terem desenvolvido, junto com a equipe técnica do Observatório do Itapetinga, um sistema para fixação do radiômetro no foco do rádio telescópio. Agradecemos ao Dr. J.R.D. Lépine pela administração, junto à FAPESP, dos recursos destinados ao projeto.

Este projeto foi realizado com recursos da FAPESP.

References

1. P. Kaufinann, Ciência e Cultura, **24**, 419 (1972).
2. C. E. Tateyama, F. M. Strauss, Mon. Not. R. Ast. Soc. **256**, 8 (1992).
3. C. E. Tateyama, F. M. Strauss, P. Kaufmann, Mon. Not. R. Ast. Soc. **249**, 716 (1991).
4. B. F.Sestokas, E. Scalise, Astr. & Ast. Supp. Ser. **88**, 177 (1991).
5. J. W. S. Vilas-Boas, E. Scalise, C. G. Sanzovo, Astron. Jour. **102**, 1734 (1991).
6. Z. Abraham, J. W. S. Vilas-Boas, Astron. & Astr. **290**, 956 (1994).
7. A. M. G. Balboa, J. R. D. Lepine, Astron. & Astro. **159**, 174 (1986).
8. M. Tornikoski, E. Voltaoja, H. Terasanta, M. Lainela, D. Bramwell, L. C. L. Botti, Astron. Journal. **105**, 1680 (1993).
9. E. Scalise, R. E. Schaal, Y. Bakor, J. W. S. Vilas-Boas, P. C. Myers, Astron. Soc. of Australia. **4**, 250 (1991)(a).

10. E. Scalise, R. E. Schaal, Y. Bakor, J. W. S. Vilas-Boas, P. C. Myers, Astron. Journal, **82**, 1939 (1991)(b).
11. J. W. S. Vilas-Boas, E. Scalise, J. L. M. Do Valle, Astrophy. Spac. Scien. **141**, 339 (1988).
12. Z. Abraham, J. R. D. Lepine, M. A. Braz, Mon. Not. R. Ast. Soc. **193**, 737 (1980).
13. P. Kaufmann, S. Zisk, E. Scalise, R. E. Schaal, R. H. Gamonn, Astron. J. **82**, 577 (1977).
14. M. W. Pospieszalski, S. Weinreb, R. D. Norrod, R. Harris, IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, **36**, 552 (1988).
15. M. W. Pospieszalski, IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, **37**, 1341 (1989).
16. P. Kaufmann, F. M. Strauss, R. E. Schaal, C. Laporte. Solar Physics, **78**, 389 (1987).
17. S. Weinreb, M.W. Pospieszalski, R. Norrod, NRAO, Eletronics Division Internal Report No. 275. Charlottesville, Virginia (1988).
18. E. Scalise, Comunicação particular, São José dos Campos, São Paulo, 1994.