

低噪声 1.2—1.8 GHz 致冷 FET 放大器*

曹逸庭

(中国科学院紫金山天文台)

提 要

本文介绍了低噪声 1.2—1.8 GHz 致冷 FET 放大器的研制工作。在 20K 环境温度下, 带宽 1.2—1.7GHz 范围内, 放大器噪声温度低于 10K, 最佳为 4K。增益约 30dB。设计了一个噪声温度自动测试系统。另外对输入电缆的噪声和总测量误差作了分析。测试总误差为 $\pm 2K$ 。

1. 引言

本文研制的 1.2—1.8 GHz 致冷 FET 放大器的原型是由温里布(Weinreb)^[1]提出的, 文献[2,3]作了进一步报道。为了适合与混频器联接作前置放大器, 通常要用一个隔直流偏置电路。这一电路将增多微波元件, 并产生一定损耗, 导致放大器的总噪声增大。本文研制的 FET 放大器将此偏置电路安装在前端, 对放大器输入匹配影响很小。在温度为 16—20K、带宽为 1.2—1.7 GHz 的范围内, 噪声温度为 10K 左右, 带内最低噪声温度为 4K。1dB 带宽可达 600MHz。放大器增益约 30dB。设计了一个噪声温度自动测试系统, 可方便地给出噪声温度随频率变化的曲线。最后对放大器输入电缆的噪声贡献和总测试误差作了分析。噪声温度测试的总误差为 $\pm 2K$ 。

2. 低噪声放大器的设计

改进后的放大器电路原理图见图 1

它是一个三级放大器。第一、二两级选用低噪声 FET-MGF1412 管, 第三级起平滑频率增益响应曲线和增加隔离性能的作用, 选用 MGF1402 管。输入端包含混频器偏置电路, 它与信号输入端的隔离度为 50dB。输出级有 10dB 内衰减, 使放大器无需外接隔离器就能稳定地工作。

放大器的低噪声和匹配性能主要由第一级决定, 放大器噪声温度的估计:

$$T_n = T_{\min} + 290 \frac{g_n}{R_s} [(R_s - R_{opt})^2 + (X_s - X_{opt})^2], \quad (1)$$

式中 $R_{opt} + jX_{opt}$ 是最佳噪声源阻抗, $R_s + jX_s$ 是信号源阻抗, g_n 是 FET 管子的噪声电导, T_{\min} 是 FET 管子的最佳噪声温度。在 300K 和 15K 温度下, MGF1412 管参数的理论计算值和实测值列于表 1(参考文献 [1])。

放大器级间的匹配采用电抗匹配方式。放大器获得最佳噪声温度的条件应使输入阻

* 1985 年 5 月 31 日收到, 1985 年 11 月 5 日修改定稿。

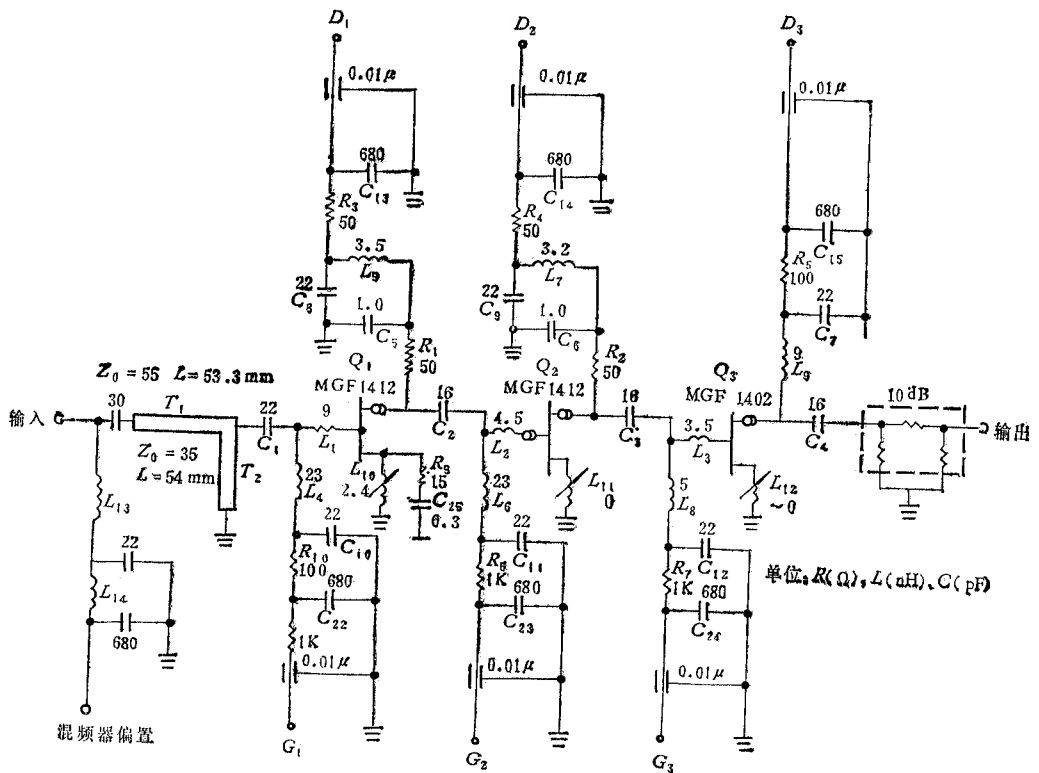


图 1 1.2—1.8GHz 致冷 FET 放大器电路原理图

表 1 MGF-1412 参数的理论计算值和实测值

环境温度 (K)	$T_{min}(K)$	$1/g_n(\Omega)$	R_{opt}	X_{opt}	
300	63 ± 3	250 ± 50	42 ± 4	—	测量值
300	20.3	17.85	60.7	221	理论值
15	8 ± 2	1200 ± 500	29 ± 2	—	测量值
15	4.2	5882	39.3	196	理论值

抗的最佳噪声源阻抗与信号源阻抗相匹配。电路采取源电极对地接一电感，通过负反馈来增大输入阻抗的实部，以利于匹配。故通过调节电感 L_{10} 和负载电抗 C_s, L_5 和 L_2 可使 FET 输入阻抗 R_{in} 增大，接近于最佳噪声源阻抗。在输入端，由传输线 $T_1, 1/4$ 波长短路 T_2 和 L_1 可使信号源阻抗 R_s 接近于 R_{in} 和 R_{opt} 。源电抗介于 X_{in} 与 X_{opt} 之间，达到宽带匹配。

3. 测试装置

测试输入匹配和增益随频率变化的方法和装置见图2。放大器输入端接一个 10dB 定向耦合器，输入失配反射信号经检波器指示，与短路全反射比较，既可得出匹配情况，并可

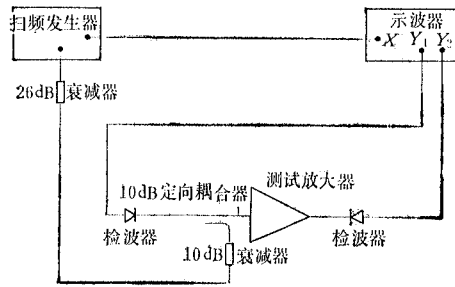


图2 输入匹配和增益随频率变化的测试系统

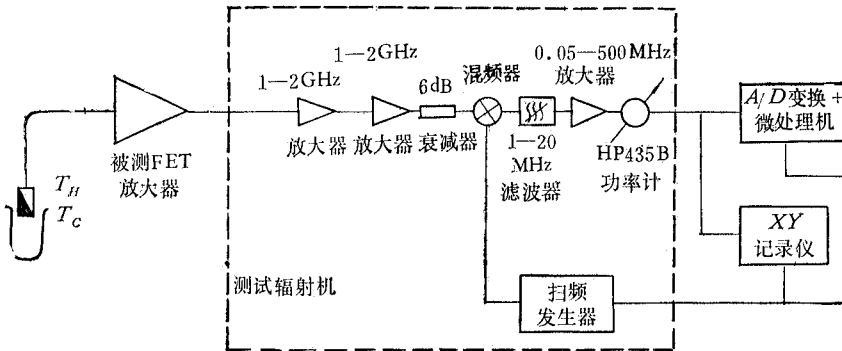


图3 噪声温度测试系统的示意图

加以调整。低噪声温度总是与良好的匹配相联系。增益频率响应曲线同时由另一个输出检波器指示。这样，在示波器上同时显示输入匹配和增益频率响应曲线。

测量噪声温度采用 ν 因子法。测试系统的原理图见图3。放大器输入端匹配负载交替置于室温和液氮温度下。我们设计了一个外差扫描系统可测得 ν 因子的二次值随频率变化的曲线，并由记录仪记下，然后计算出各频率点的噪声温度。另外也可通过 A/D 变换，输入微机进行处理计算直接描绘出噪声温度曲线。这样，可避免逐点计算，可以每调整一个元件，快速地知道对噪声的影响，迅速地获得放大器的最佳噪声温度。利用微机控制的测试装置，我们正在进行之中。

4. 放大器输入电缆的损耗及其对噪声的贡献

在低温下，测试放大器的输入端必有一段电缆。一般采用导热性较差的不锈钢合金材料做成的同轴电缆。它具有一定的损耗，对噪声有一定的贡献，对于低噪声放大器，是不能忽略的。

包括输入电缆在内的放大器的噪声温度由

$$T_{FET} = T'_{FET} \cdot L + (L - 1)T_p \tag{2}$$

表示，式中 L 是电缆损耗， T_p 是电缆温度。

放大器的真实噪声温度为

$$T'_{FET} = T_{FET} \cdot \frac{1}{L} - \left(1 - \frac{1}{L}\right)T_p \tag{3}$$

电缆的损耗和温度测定后,就可得到放大器的真实噪声温度。测试电缆损耗和温度的原理图见图 4,测试系统的示意图见图 5。

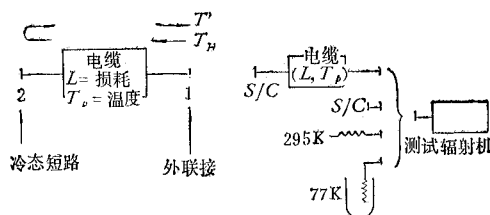


图 4 测试电缆损耗和温度的原理图

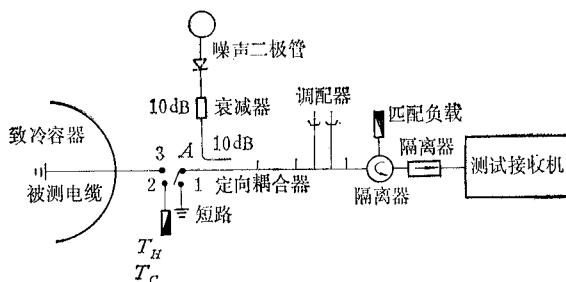


图 5 测试电缆损耗和温度的示意图

测试原理如下: 当温度 T_H 从 1 传输到 2, 被短路全反射又回到 1 时, 得到温度 T' 。

$$\begin{aligned} T' &= \left[\frac{T_H}{L} + T_p \left(1 - \frac{1}{L} \right) \right] \frac{1}{L} + T_p \left(1 - \frac{1}{L} \right), \\ &= \frac{T_H}{L^2} + T_p \left(1 - \frac{1}{L^2} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

T' , L 可以测定, T_p 则可由

$$T_p = \frac{L^2 T' - T_H}{L^2 - 1} \quad (5)$$

确定。当 A 点按图 5 分别联接 1, 2, 3 三点时, 我们分别测得输出 $V_{S1}, V_{S2}, V_{SN1}, V_{SN2}, V_H$ 和 V_C 。这里, 下标 S 和 SN 分别表示噪声源关和开; H 和 C 分别表示负载置于室温和液氮温度; 1 和 2 分别表示 A 点短路和联接一段在低温下短路的电缆。

通过计算可得:

$$L^2 = \frac{V_{SN1} - V_{S1}}{V_{SN2} - V_{S2}}, \quad (6)$$

$$T' = T_C + (V_{S2} - V_C) \cdot \frac{T_H - T_C}{V_H - V_C}. \quad (7)$$

一段 10cm 输入电缆在 15K 下测得电缆损耗 $L = 0.067$ dB, 电缆温度 $T_p = 89$ K。如果使用这样的电缆, 测量放大器的总噪声温度为 10K 的话, 用(3)式加以修正, 电缆贡献的噪声为 1.5 K。

5. 噪声温度测试总误差的分析

测试噪声温度用的是 γ 因子法。

$$T_{FET} = \frac{T_H - T_C y}{y - 1} = \frac{T_H - T_C}{y - 1} - T_C. \quad (9)$$

对上式全微分,可得每项误差

$$\Delta T_{FET} = \left(\frac{1}{y-1}\right) \Delta T_H + \left(\frac{1}{y-1} + 1\right) \Delta T_C + \frac{T_H - T_C}{(y-1)^2} \Delta y, \quad (10)$$

即总误差由室温,液氮温度测试误差和 y 因子测试误差所组成.

设误差 ΔT_C 为 $\pm 1K$, 误差 ΔT_H 为 $\pm 0.5K$, Δy 项取决于功率计精度和测试辐射机的线性和稳定度. HP435B 功率计精度为 $\pm 1\%$, 测试辐射机线性和稳定度实际测定误差最大为 $\pm 1\%$, 所以 Δy 误差可为 $\pm 2\%$. 计算可得,

$$\Delta T = 0.4 + 0.7 + 0.75 = 1.85K.$$

表 2

放大器编号	4	5	6
第一级偏置 (V,mA)	5,10	5,10	5,12
第二级偏置 (V,mA)	5,10	5,10	5,8
第三级偏置 (V,mA)	5,10	5,10	5,8
环境温度(K)	21.8	17	16
最佳噪声温度(K)	8.3	6	4
环境温度(K)	295	295	295
最佳噪声温度(K)	48	43	50
最高增益 (dB)	33.5	36	29
-1dB f_L (GHz)	1.15	1.23	1.29
-1dB f_H (GHz)	1.74	1.70	1.75

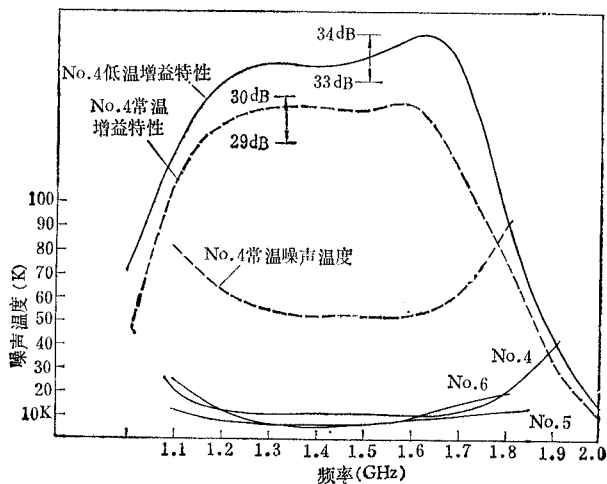


图 6 放大器增益、噪声温度在室温和低温下的特性

最大测试总误差取安全值为 $\pm 2\text{K}$ 。

6. 结果和其他

为获得在低温下工作稳定可靠的放大器, 必须选择可靠的低温元器件, 注意焊接工艺。为获得最佳噪声温度和增益频率响应, 必须在室温和致冷下反复进行测试调整。

我们共研制了六台致冷 FET 放大器。其中三台的性能见表 2。

噪声温度、增益随频率的变化曲线见图 6。

此工作部分在西德马普射天文研究所完成, 作者感谢 N. J. Keen 的帮助和支持。

参 考 文 献

- [1] S. Weinreb, Electronics Division Internal Report No. 220, NRAO, Sept. 1981.
- [2] D. R. Williams, W. Lum and S. Weinreb, *Microwave J.*, 23(1980), 73.
- [3] S. Weinreb, *IEEE Trans. on MTT*, **MTT-28**(1980), 1041.
- [4] C. A. Liechti and R. A. Larrick, *ibid.*, **MTT-24**(1976), 376.
- [5] P. Wolf, *IBM J. Res. Develop.*, 14(1970), 125.
- [6] M. Schneider, *Bell Sys. Tech. J.*, 48(1969), 1421.
- [7] T. Suzuki, A. Nara, M. Nakatani and T. Ishii, *IEEE Trans. on MTT*, **MTT-17**(1979), 1070.
- [8] H. Fukui, *ibid.*, **MTT-27**(1979), 643.

A LOW-NOISE 1.2—1.8 GHz COOLED GaAs FET AMPLIFIER

Cao Yiting

(Purple Mountain Observatory, Academia Sinica)

A low-noise 1.2—1.8 GHz cooled GaAs FET amplifier with mixer bias circuit is reported. The amplifier noise temperature obtained at 20 K ambient in the frequency range of 1.2—1.7 GHz is 10 K. The lowest noise temperature is 4 K. The gain is about 30 dB. An automatic measuring instrument for noise temperature was designed. The noise effect of the input cable and the error analysis of total measuring were made. The total measurement error is 2 K.