

小型超高频低噪声 FET 放大器 的设计和性能*

王文骐

(上海科技大学分部)

杨新民 陆祝平 朱文玉

(中国科学院上海冶金研究所)

提 要

本文报道了 UHF 频段小型低噪声 GaAs MESFET 放大器的设计考虑、射频性能和试验结果。采用特殊的匹配网络和 CAD 技术使电路达到小型化和最佳化。设计的二级 700MHz 和三级 1000MHz 放大器均制作在 $50 \times 60 \times 0.8\text{mm}^3$ 的陶瓷基片上。其射频性能分别为：功率增益 G_p 为 25dB (最佳 29dB) 和 30dB, 噪声系数 NF 低于 1.1dB (最佳 0.8dB) 和 1.2dB, 带宽 W 约为 40MHz (3dB) 和 100MHz (1dB)。用 700MHz 放大器装成的卫星直播电视接收机, 接收图像清晰, 伴音音质良好。

一、引 言

低噪声、高增益的前置放大器是卫星直播电视接收机的关键部件之一。目前在 UHF 频段使用的一般为硅晶体管放大器, 其 $NF \approx 2-3\text{dB}$, 要进一步改善噪声性能受到硅晶

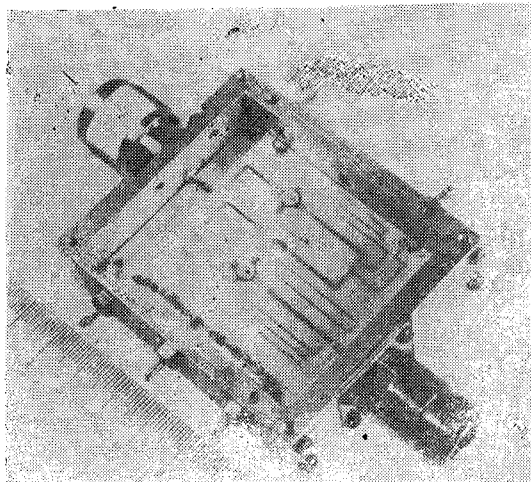


图1 二级 700MHz 低噪声 GaAs FET 放大器照片

体管本身性能的限制, GaAs MES FET 的出现为此提供了可能。通常 GaAs MES FET 用于 2GHz 以上的频率范围, 改变设计后, 则可用到 2GHz 以下的 UHF 频段^[1-4]。本文报道了 UHF 频段的小型低噪声 GaAs MES FET 放大器的设计考虑、射频性能和试验结果。

二、设计考虑

一个完整的二级 700 MHz 低噪声放大器示于图 1。它由两只 DGM 型 GaAs 双栅 MES FET、输入输出匹配网络和级间匹配网络组成。整个电路制作在陶瓷基片上, 其 $\epsilon_r = 9$, 大小为 $50 \times 60 \times 0.8 \text{mm}^3$ 。图 2 示出了该放大器的主要电路成份。

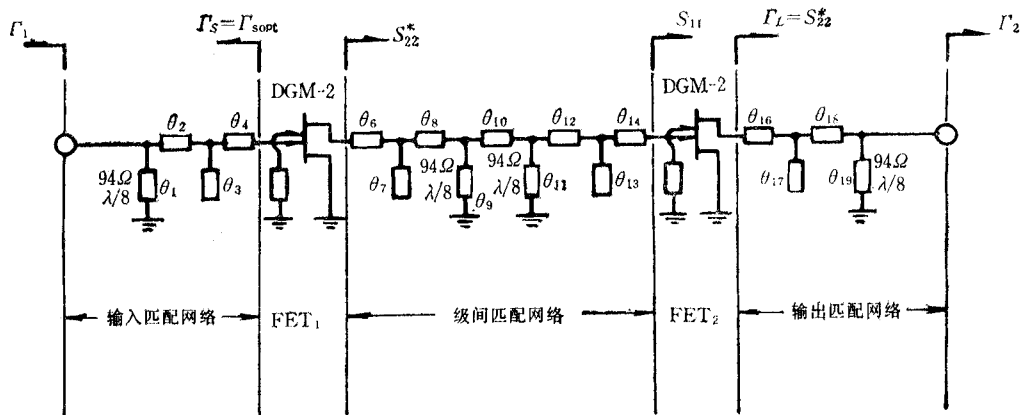


图 2 二级 700MHz 低噪声 GaAs FET 放大器电路图 ($f = 714 \text{MHz}$)

1. DGM 型 GaAs 双栅 FET 的微波特性 在 1GHz 下其典型的微波参数为: $NF \leq 1.2 \text{dB}$, 相应功率增益 $G_a = 11 \text{dB}$ 。在漏源电压 $V_{DS} = 4 \text{V}$, 漏电流 $I_{DS} = 15 \text{mA}$ 下用 HP 公司网络分析仪测得的器件的 S 参数与频率关系如表 1 所示。

与单栅器件不同, GaAs 双栅 FET 由于增加了第二栅, 便成为一个三端口网络, 而且第二栅端口的反射系数 Γ_3 对器件的微波参数影响甚大。为使放大器具有良好的增益和噪声性能, 我们在 DGM 型 FET 的第二栅端口端接一特性阻抗为 50Ω 的短路短截线, 使 Γ_3 为 $1 \angle 163^\circ$ ^[5]。

表 1 S 参数与 f 的关系

$f(\text{MHz})$	S_{11}		S_{12}		S_{21}		S_{22}	
	$ S_{11} $	$\angle S_{11}$	$ S_{12} $	$\angle S_{12}$	$ S_{21} $	$\angle S_{21}$	$ S_{22} $	$\angle S_{22}$
500	0.985	-18°	3.16×10^{-3}	86°	1.871	147.5°	0.912	-16°
600	0.955	-18°	3.89×10^{-3}	86°	1.613	143°	0.912	-18°
700	0.912	-16°	4.17×10^{-3}	88°	1.613	142°	0.871	-21°
1000	0.891	-18°	6.31×10^{-3}	87°	1.739	125°	0.831	-29°

2. 电路形式的确定 微带电路与集总参数电路相比，具有结构可靠、性能稳定、重复性好且适于批量生产之优点。但在 UHF 频段，由于受到电路尺寸的限制，一般多采用集总元件电路^[4,6,7]。本文则在微带电路基础上采取以下两个措施：(1)用直流偏置电路兼作射频匹配网络的一部分，以缩短偏置线，达到小型化(2)借助于 CAD 技术使电路最佳化。从而得到小型、可靠的 UHF 频段电路。

3. 输入输出和级间匹配网络的考虑 由表 1 知，有源器件的 $|S_{12}|$ 在 10^{-5} 数量级，故放大器取单向化设计。为了同时满足噪声和增益要求，前级按最小噪声系数设计；后级按最大增益设计。输入匹配网络是用来完成 $\Gamma_s = \Gamma_{s, opt}$ 到 $\Gamma_1 = 0$ 的变换的，其中 $\Gamma_{s, opt}$ 为最佳信源反射系数， Γ_1 为信源端口反射系数（见图 2）。采用的是 π 型网络，其中一个并联分

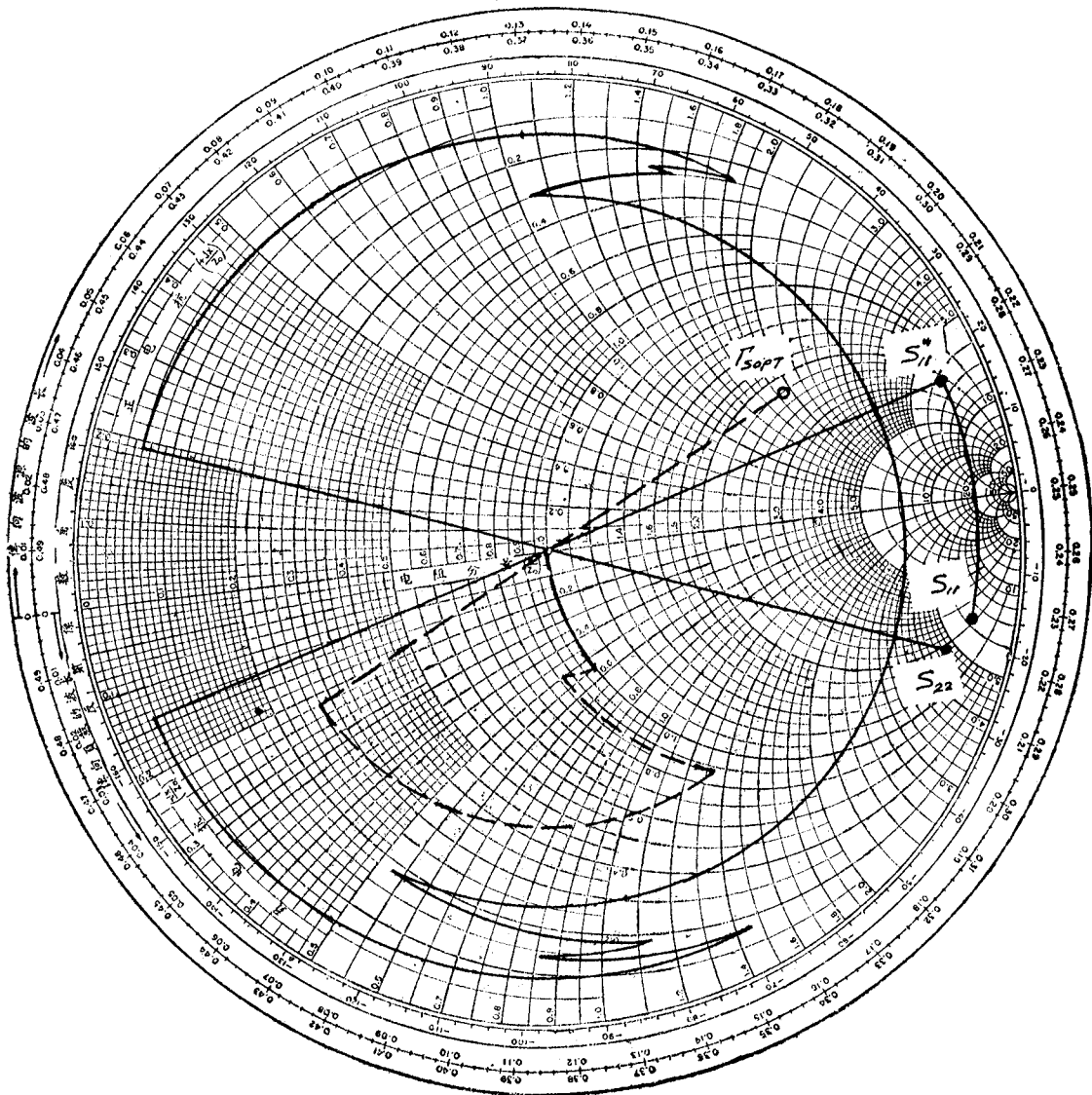


图 3 匹配网络设计

支为 FET₁ 的栅源偏置线,对 714MHz 呈 $\lambda/8$ 短路线。图 3 中虚线示出了 $\Gamma_{s, opt}$ 到 $\Gamma_1 = 0$ 的变换。输出匹配网络采用的形式与输入网络相同,用来完成 $\Gamma_L = S_{22}^*|_{FET_2}$ 到 $\Gamma_2 = 0$ 的变换;图 3 实线示出了这一变换,其中 Γ_2 为负载端口的反射系数; $S_{22}^*|_{FET_2}$ 与 $S_{22}|_{FET_2}$ 共轭;漏源直流偏置线对 714MHz 亦呈 $\lambda/8$ 短路线。级间匹配网络采用双 π 型形式。前级输出阻抗和后级输入阻抗通过直接匹配实现。 θ_9, θ_{11} 为偏置电路的长度;级间传输线长度 θ_{10} 和分支线长度 θ_7, θ_{13} 的多种组合可实现相同的匹配功能,有利于对基片的利用。

为了缩小电路尺寸,借助于计算机研究了并联分支匹配线的特性阻抗 Z_{05} 与放大器频应特性的关系。结果(图 4)表明影响甚小。因此匹配网络的所有并联分支线的特性阻抗均取 94Ω 。主传输线特性阻抗 Z_0 均取 50Ω 。

4. 计算机辅助分析 图 2 所示二级放大器为树状结构。我们把它分割成 19 个二口网络,其级联的总 A 矩阵为: $[A] = \prod_{i=1}^{19} [A]_i$, 式中 $[A]_i$ 为第 i 个二口网络的 A 矩阵。把 $[A]$ 转换成 $[S]$, 即可算得放大器的特性。其中 $[A]_{i=5,15}$ 决定于 FET 器件的模型。表 2 列出了用电子计算机最小二乘法程序,处理表 1 中的 S 参数,建立起来的 FET 器件的数学模型。图 5(a) 和 (b) 分别给出了处理 S 参数测量值的程序框图和分析放大器频应特性的程序框图。图 6(a) 示出了放大器的功率增益 G_p 和稳定系数 K 与匹配网络中直流偏置线长度 $\theta_i (i = 1, 9, 11, 19)$ 和级间传输线长度 θ_{10} 的关系;图 6(b) 为不同长度的 θ_{10} 下放大器的频应特性。据此取 $\theta_{10} = 0.288\lambda_g, \theta_i = 0.125\lambda_g (i = 1, 9, 11, 19)$ 。

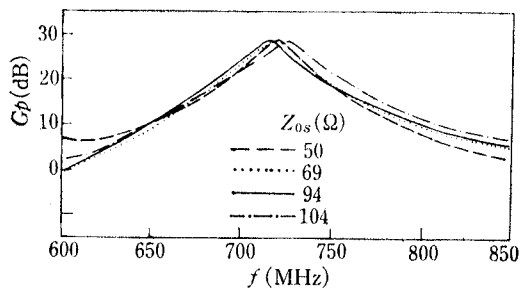
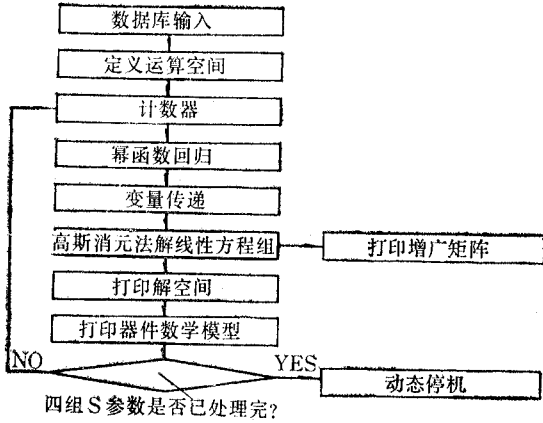


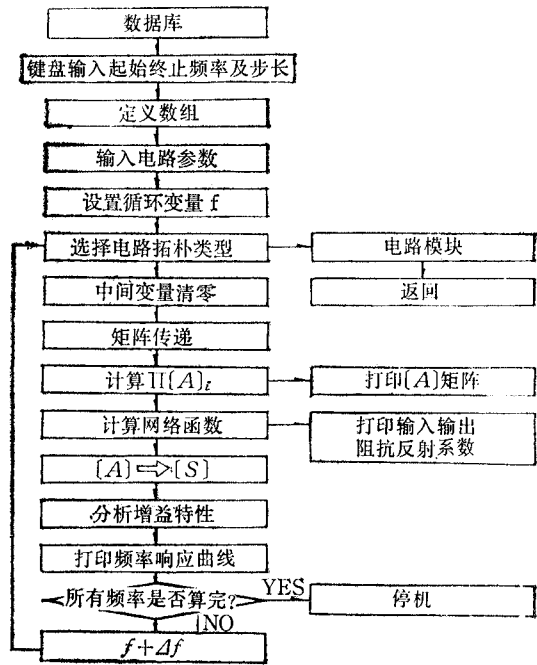
图 4 分支匹配线特性阻抗 Z_{05} 与放大器频应特性的关系

表 2 FET 器件的数学模型

		逼近多项式
S_{11}	$ S_{11} $	$1.33038 - 0.9311340 * f + 0.491547 * f^2$
	$\angle S_{11}$	$-55.8048 + 121.037 * f - 93.1768 * f^2$
S_{12}	$ S_{12} $	$2.1057E - 5 + 4.76081E - 6 * f + 3.70747E - 5 * f^2$
	$\angle S_{12}$	$74.219 + 32.9886 * f - 20.1471 * f^2$
S_{21}	$ S_{21} $	$3.81596 - 5.8297 * f + 3.74049 * f^2$
	$\angle S_{21}$	$140.78 + 39.6819 * f - 55.3279 * f^2$
S_{22}	$ S_{22} $	$0.968142 - 4.85694E - 2 * f - 0.107508 * f^2$
	$\angle S_{22}$	$-7.99634 - 10.756 * f - 10.2592 * f^2$

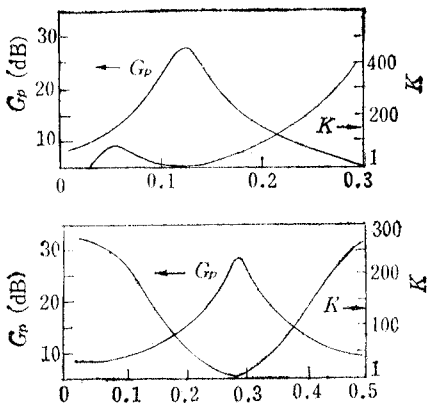


(a) 处理 S 参数测量值的程序框图

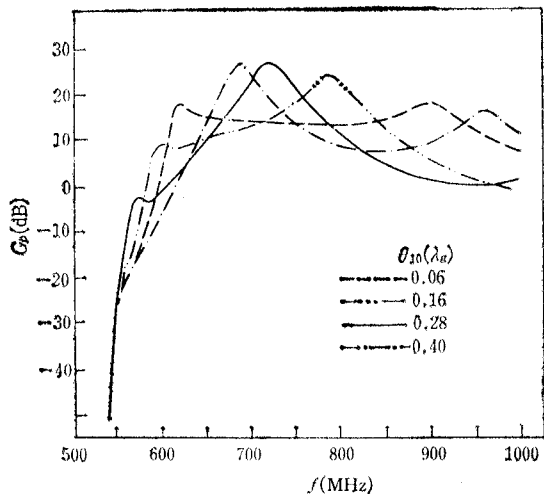


(b) 分析放大器频应特性的程序框图

图 5



(a) 放大器的 G_p 和 K 与 θ_{10} ($i=1,9,11,19$) 和 θ_{10} 的关系 ($f=714\text{MHz}$ 时)



(b) 不同长度 θ_{10} 下放大器的频应特性

图 6

图 7 为三级 1000 MHz 低噪声放大器的照片，其基片尺寸与二级 700 MHz 放大器相同。

为了防止开关机对放大器有源器件的电冲击，在 FET 漏源和栅源直流偏置电路中加入由四只反向击穿电压为 5V 的齐纳二极管组成的保护电路(见图 1)。

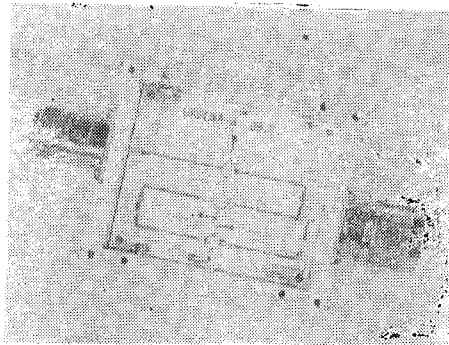
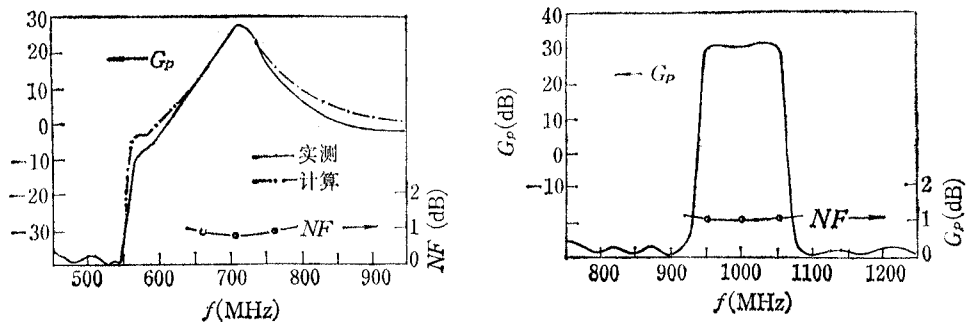


图7 三级 1000MHz 低噪声 GaAs FET 放大器照片

三、射频性能和试验结果

二级 700MHz 放大器的小信号功率增益 G_p 和噪声系数 NF 与频率 f 的关系分别用扫频图示仪 (XSQ-1)、显示器 (BP-12-1) 和噪声源 (MODEL 125A)*、噪声系数仪 (MODEL 117B)* 测得, 如图 8(a) 实线所示。由图可见, 在中心频率 $f_0 = 714\text{MHz}$ 处, $NF < 1.1\text{dB}$, $G_p > 25\text{dB}$, $W \sim 40\text{MHz}$ (3dB)。图中点划线为计算值, 与实测值相当吻合。曲线在高频端产生的偏差与器件的 S 参数在高频端取点过少有关。图 8(b) 为三级 1000MHz 放大器的 G_p 和 NF 的实测值。由图可见, 在 950—1050MHz 的频率范围内, $G_p \geq 30\text{dB}$, $NF < 1.2\text{dB}$, 带内增益波动 $\leq 1\text{dB}$ 。



(a) 二级 700MHz 放大器性能

(b) 三级 1000MHz 放大器测试性能

图 8

二级 700MHz 放大器通过连续 500 小时通电考核试验, 并分别在北京 (-10°C)、南京、上海 (20°C) 和广州 (30°C) 等地在卫星直播电视接收机上实际应用, 表明接收图像清晰, 伴音音质良好, 性能稳定可靠。

本项工作中得到本所六室提供的优质 DGM 型 FET, 电子工业部九二四厂、邮电部通讯设备厂和上

* 瑞典 MAGNETIC AB 公司产品, 误差 0.1 dB

海七宝电台在接收试验中给予的多方面支持,王渭源副研究员对本文所作的修改,在此一并表示感谢.

References

- [1] M. Miama and H. Katoh, *Electron. Lett.*, **14** (1978), 319.
- [2] Takeshi Sato, et al., *National Tech. Report*, **26** (1980), 334.
- [3] 王渭源等, *半导体学报*, **3**(1982), 493.
- [4] Shotaro Nambu, et al., *IEEE J. of SC*, **SC-17** (1982), 648.
- [5] 杨新民、王渭源、王文骥, *应用科学学报*, **3**(1985), 46.
- [6] James Fawcette, *Microwave Systems News*, **10** (1980)2, 42.
- [7] G. Barbari, *Microwaves and RF*, **23** (1984)2, 141.

DESIGN AND PERFORMANCE OF COMPACT LOW NOISE GaAs MESFET AMPLIFIERS FOR UHF OPERATION

Wang Wenqi

(*Shanghai University of Science and Technology, Branch*)

Yang Xinmin, Lu Zhuping, Zhu Wenyu

(*Shanghai Institute of Metallurgy, Academia Sinica*)

The design considerations and experimental results of compact low noise GaAs MESFET amplifiers for UHF operation were described in this paper. The miniaturized and optimized circuits were obtained by means of special matching network and CAD technique. Both two-stage unit at 700 MHz and three-stage unit at 1000 MHz were fabricated on $50 \times 60 \text{ mm}^2$ alumina substrate, and the power gain of 29 and 30 dB, noise figure of 0.8 and 1.2 dB and bandwidth of 40(3 dB) and 100 MHz (1 dB) were obtained, respectively. The satellite direct broadcasting receiver constructed with the 700 MHz GaAs MESFET amplifier has clear pictures and good sound.