

微波系统前端放大器的计算机辅助设计与实现

何建国 赫崇骏

向才昂

(国防科技大学)

(湘潭大学)

摘 要 本文介绍了微波放大器机辅设计的各种方法,介绍了考虑各种因素后所编制的 LCAD 软件及其特点。用 LCAD 软件设计制作了两个放大器,一个已成功地用于某雷达中,其指标达到国内同类产品领先水平,另一个也有较高的性能指标,而且两者的理论值与实测数据十分吻合。这在微波放大器的设计中是很难达到的,说明了 LCAD 软件是十分成功的。

关键词 机辅设计, 雷达, 微波放大器

分类号 TN722.16

微波砷化镓场效应管 (GaAsFET) 的诞生,给微波系统小型化、固态化创造了条件。由于砷化镓场效应管在一个相当宽的频率范围内具有低噪声、高增益、大动态范围和相位线性好的特点,而且用它设计的放大器电路简单,可靠性高,使得它在微波放大器的设计中成为首选器件。近十多年来,已有大量资料报道这方面的成果^{[1][6]},提出了各种分析方法和设计方法,其中微波电路的机辅设计占有十分重要的地位。这种方法由于采用了能精确反映器件特性的数学模型,在目标函数中综合考虑各频率点的增益、噪声系数等,由计算机自动选择电路参数,所以能给出电路的优化设计,从而解决用经典方法不能解决的问题。本文首先介绍机辅设计的方法,简要介绍我们编制的 LCAD 软件,最后介绍我们用 LCAD 软件设计的两个微波放大器,它们的增益、噪声系数、动态范围等指标均达到国内领先水平。设计表明,LCAD 软件具有通用性,不需作任何修改即可设计不同要求的放大器,还可以设计如滤波器、衰减器等微波器件。实验结果表明,用该软件设计放大器,只要管子的 S 参数准确,工艺上保证精度要求,几乎不用任何调整就能达到原设计要求。

1 计算机辅助分析方法的选择及拓扑结构

微波电路机辅分析大都采用矩阵分析法^[2]。这主要是由于以下两方面的原因:一是矩阵分析很适合计算机计算;二是由于微波元器件很难从纯理论研究中建立精确的数学模型,而矩阵分析方法把它们作为网络处理,直接可用测量得来的网络参数模拟这些元器件。因为元器件的网络参数能在实际使用的条件下进行测量得到,所以由此建立起来的数

学模型是相当精确的。目前广泛应用的矩阵分析法有三种：传递矩阵法，节点导纳法和散射矩阵法。传递矩阵法算法简单，运算速度快，要求的内存量小，但只能处理由 $2n$ 端口元件组成的级联电路，节点导纳法和散射矩阵法能处理任意端口元件，任意连接组成的电路，但其算法比较复杂，要求内存容量较大，分析级联和分支电路显得不够方便。我们采用 S 矩阵与 A 矩阵相互转换的方法编制了LCAD软件，在VAX I-BA123上只需几分钟便可优化出结果。

根据放大器的指标特性，可建立不同的拓扑结构和数学模型，通常分为三种情况，现分述如下：

1.1 微波放大器常用的拓扑结构和数学模型

所谓常用的拓扑结构就是指对噪声无特殊要求的情况，其电路的原理性拓扑结构和数学模型如图1所示。

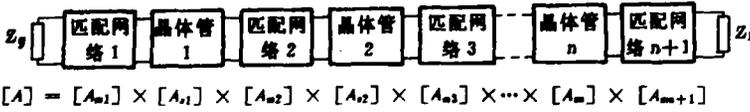


图1 微波放大器常用的拓扑结构和数学模型

只要求出整个电路的 $[A]$ 矩阵，其电路特性就可由下列公式求出。

$$\text{输入阻抗} \quad Z_{in} = \frac{A_{11}Z_L + A_{12}}{A_{21}Z_L + A_{22}} \quad (1)$$

$$\text{输出阻抗} \quad Z_{out} = \frac{A_{22}Z_g + A_{12}}{A_{21}Z_g + A_{11}} \quad (2)$$

$$\text{输入电压反射系数} \quad \Gamma_{in} = \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \quad (3)$$

$$\text{输出电压反射系数} \quad \Gamma_{out} = \frac{Z_{out} - Z_0}{Z_{out} + Z_0} \quad (4)$$

$$\text{输入电压驻波比} \quad \rho_{in} = \frac{1 + |\Gamma_{in}|}{1 - |\Gamma_{in}|} \quad (5)$$

$$\text{输出电压驻波比} \quad \rho_{out} = \frac{1 + |\Gamma_{out}|}{1 - |\Gamma_{out}|} \quad (6)$$

式中的 Z_0 为系统的参考特性阻抗。

电压传输系数

$$T = \frac{U_L}{U_g} = \frac{Z_L}{A_{11}Z_L + A_{12} + A_{21}Z_gZ_L + A_{22}Z_g} = T_r + jT_j \quad (7)$$

传输增益

$$G = 10 \log(T_r^2 + T_j^2) \frac{4R_c(Z_g)R_c(Z_L)}{|Z_L|^2} \quad (8)$$

传输相位延迟

$$\varphi = - \operatorname{tg}^{-1} \frac{T_j}{T_r} \quad (9)$$

优化电路的目标函数为

$$\begin{aligned} \text{SUM} = & W_1 \sum_{i=1}^n [G(f_i) - G_0(f_i)]^2 + W_2 \sum_{i=1}^n [\rho_{in}(f_i) - 1]^2 \\ & + W_3 \sum_{i=1}^n [\rho_{out}(f_i) - 1]^2 \end{aligned} \quad (10)$$

式中 W_i 是加权因子, n 是频率抽样点数, $G_0(f_i)$ 是在频率 f_i 的增益目标值。

1.2 具有最佳噪声的微波晶体管放大器拓扑结构和数学模型

卫星通信、微波中继、雷达等领域对接收机的灵敏度提出了更高的要求。为了在弱信号情况下检测出信号,应使放大器具有最低的噪声系数,为此人们把第一级晶体管的源反射系数设计为 Γ_{ON} 。由于放大器总噪声系数受第一级影响最大,这样的设计就近似地做到了总噪声系数最小。电路的原理性拓扑结构和数学模型如图2所示。

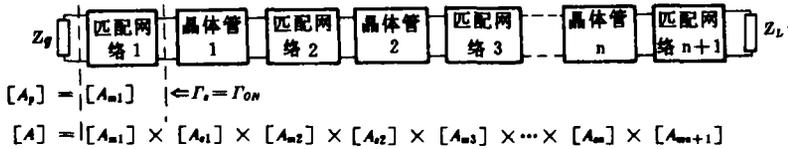


图2 具有最佳噪声系数的微波放大器的拓扑结构和数学模型

第一级晶体管的最小噪声系数为

$$F = F_{\min} + 4R_N Y_0 \frac{|\Gamma_i - \Gamma_{ON}|^2}{(1 - |\Gamma_i|) |1 + \Gamma_{ON}|^2} \quad (11)$$

这时优化电路的目标函数为

$$\begin{aligned} \text{SUM} = & W_1 \sum_{i=1}^n [G(f_i) - G_0(f_i)]^2 + W_2 \sum_{i=1}^n [\rho_{in}(f_i) - 1]^2 \\ & + W_3 \sum_{i=1}^n [\rho_{out}(f_i) - 1]^2 + W_4 \sum_{i=1}^n |\Gamma_i(f_i) - \Gamma_{ON}(f_i)|^2 \end{aligned} \quad (12)$$

1.3 具有最小噪声量度的微波晶体管放大器拓扑结构和数学模型

除了以上两种方法,还有对各级放大器在最佳噪声和最大增益方面进行适当折衷的设计方法,这就是最小噪声量度设计。

最小噪声量度设计的具体拓扑结构图和算法如图3所示。

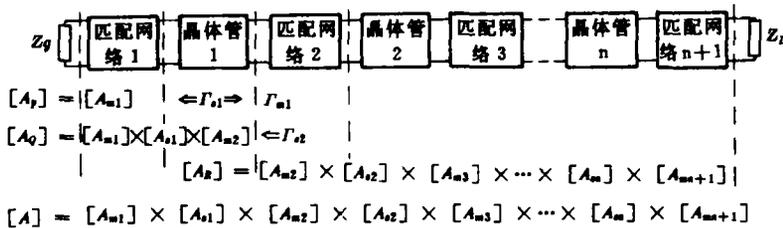


图3 具有最小噪声量度的微波放大器的拓扑结构和数学模型

优化的目标函数为

$$\begin{aligned} \text{SUM} = & W_1 \sum_{i=1}^n [(G(f_i) - G_0(f_i))]^2 + W_2 \sum_{i=1}^n [\rho_{in}(f_i) - 1]^2 \\ & + W_3 \sum_{i=1}^n [\rho_{out}(f_i) - 1]^2 + W_4 \sum_{i=1}^n |\Gamma_{s1}(f_i) - \Gamma_{om}(f_i)|^2 \\ & + W_5 \sum_{i=1}^n |\Gamma_{s2}(f_i) - \Gamma_{om}(f_i)|^2 + W_6 \sum_{i=1}^n |\Gamma_{m1}(f_i) - \Gamma_{mL}(f_i)|^2 \end{aligned} \quad (13)$$

以上讨论了微波晶体管放大器三情况下的分析方法和优化目标函数。要使放大器的性能达到最优，就要求式(10)、(12)和(13)的SUM达到最小。这是一个多变量情况下的数学规划问题。我们采用了Nelder和Mead提出的单纯形加速法。这种方法的优点是算法结构简单、实用，数值稳定性好。该方法的详细内容参考文献[3][4]。

2 LCAD 软件介绍

依据上面的数学模型，我们编制了LCAD软件，有关软件的详细情况参考文献[5]。本文只简要介绍该软件的特点：(1)建立表征微波电路的方程迅速、方便，输入数据简便易行；(2)程序中建立了多个OPEN区，使固有参量调用方便，修改待优化量快，从而使计算速度加快；(3)需用的存贮空间小；(4)对各级S参数分别拟合，分别贮存，更便于多目标要求的放大器设计；(5)具有通用性，可用于其他微波电路，如滤波器、衰减器等的设计；(6)有人机对话功能，可随时改变设计模型进行优化，使结果达到最佳。

LCAD的流程图如图4所示。整个程序由一个主程序和五个子程序组成。这些子程序是：(1)S参数处理子程序SDSPS，它的作用是运用最小二乘曲线拟合法求出采样点上的S参数，计算出晶体管的稳定因子K，稳定圆的圆心和半径等参数。(2)优化子程序POLOP，该程序采用单纯形法对目标函数进行优

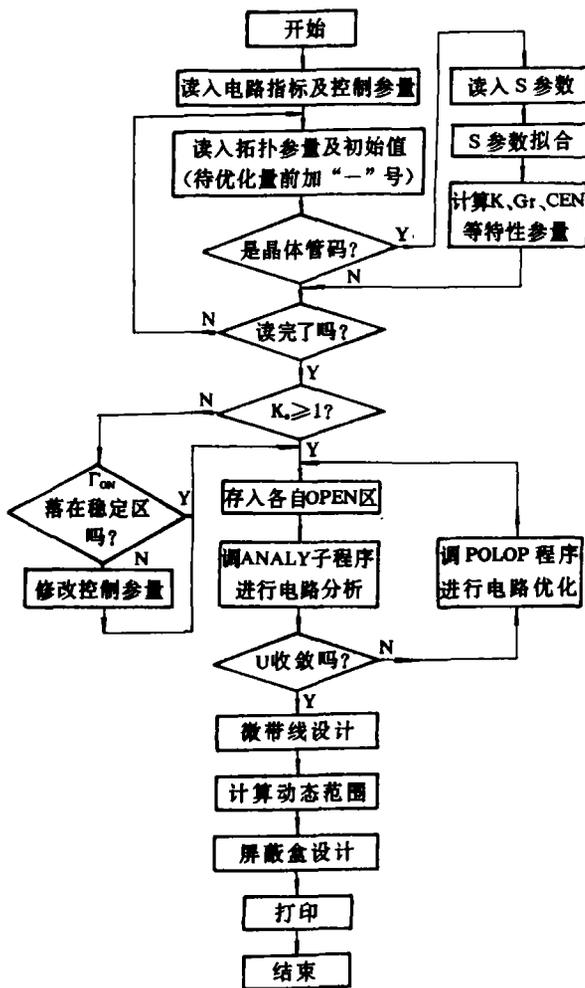


图4 LCAD 流程框图

化。(3)电路分析子程序 ANALY, 它计算各频率点 f_i 上的 $[A]$ 矩阵, 并被 POLOP 所调用, 它在整个程序中使用频率最高, 因此它的算法经过了精心的考虑。(4)敏感度分析子程序 TOLER, 它计算当各电路待优化的元件值有微小变化时, 对目标函数的影响, 以便我们在实际制作时知道哪些元件精度要求高, 哪些影响较小。(5)结果打印子程序, 它给出设计的最后结果, 包括各种性能指标和结构尺寸。

3 实验结果

我们用 LCAD 程序设计了两个放大器, 在 VAX II - B123 机上只运行几分钟就得出设计结果, 其中一个已成功地应用于某雷达接收机中, 改善了雷达的性能。该放大器选用两只日电公司的 NE75083 MESFET, 在 2.8—3.2GHz 的频率范围内, 其增益、噪声系数、输入输出驻波比和 1dB 压缩点的数据分别如图 5、图 6、图 7、图 8 和图 9 所示。图中实线为实测值, 虚线为理论值, 可见二者十分吻合。

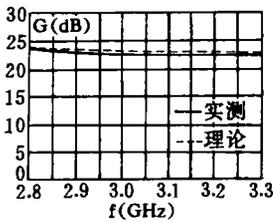


图 5 增益曲线

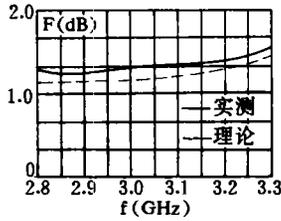


图 6 噪声系数

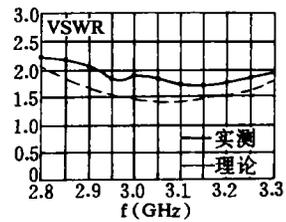


图 7 输入驻波比

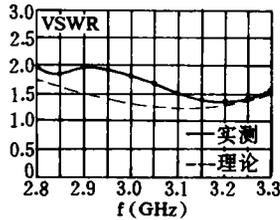


图 8 输出驻波比

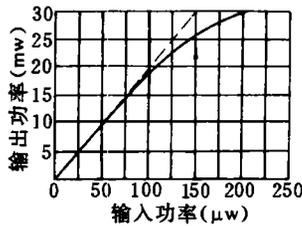


图 9 1dB 压缩点输出

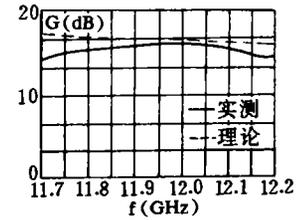


图 10 用 NE67383 做的两级放大器的增益与理论值比较

我们还用 LCAD 程序设计了 K_u 波段卫星接收机用 MESFET 放大器, 该放大器为二级放大, 场效应管选择为日电公司的 NE67383, 在 11.7—12.2GHz 频带内, 其增益、驻波系数的实测值与理论值分别如图 10 和图 11 所示, 可见其差异较小。

4 结论

采用计算机辅助设计微波放大器具有快速准确、调试简

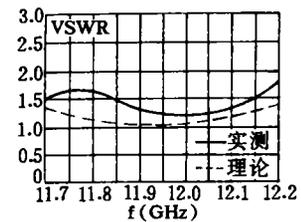


图 11 输入电压驻波比

单的优点。我们编制的 LCAD 软件由于考虑了设计中的各种因素，使得用它设计放大器更显得方便、准确。尤其在宽带放大器的设计中表现出独特的优点，这在设计两个放大器得到了充分的证明。两个放大器的理论和实测数据十分吻合，这在微波放大器的设计中是很难达到的，并且几乎不作任何调整就可达到设计的要求。这说明 LCAD 软件设计十分成功。

参 考 文 献

- 1 Hatsuaki Fukui. Low-Noise Microwave Transistors & Amplifiers. New York, IEEE, 1981
- 2 Gupta K C. Computer Aided Design of Microwave Circuits. Artech Houvo, Inc 1981
- 3 Jonn W B. Optimization Methods for Computer Aided Design. IEEE Trans MTT-17. 1969
- 4 席少霖, 赵风治. 最优化计算方法. 上海科学技术出版社, 1983
- 5 向才昂. 频率捷变雷达中 LNA 机辅设计与实现. 国防科技大学硕士论文, 1989
- 6 张乾本. 微波晶体管放大器的计算机辅助设计. 固体电子学研究与进展, 1986, 6 (3)

Computer Aided Design and Realization of the Front— end Amplifier for Microwave Systems

He Jianguo He Chongjun

(National University of Defense Technology)

Xiang Caiang

(Xiangtan University)

Abstract

Various methods for the computer aided design of microwave amplifier are outlined in this paper, the LCAD program and its characteristics are presented. Using this program, two microwave amplifiers are designed. They have excellent performance, and have been applied successfully in radar. It shows that the theoretical values are in quite agreement with the experimental values.

Key words microwave amplifier, computer aided design, radar