

微波放大器增益与噪声关系的分析方法*

延 波** 徐 静 薛良金

(电子科技大学应用物理所 成都 610054)

【摘要】 提出了一种在微波宽带低噪声放大器设计中,放大器增益性能与噪声性能之间关系的解析表达式,对其解析解进行了详尽的讨论,大大简化了传统的设计过程,并对微波低噪声 HEMT 器件 JS8905-AS 的性能进行了分析设计,经验证,与传统方法的结果相吻合。

关键词 微波宽带低噪声放大器; 增益性能; 噪声性能; 解析表达式

中图分类号 TN015

微波低噪声放大器的基本设计方法分为最大增益设计和最低噪声设计,但在实际的级联低噪声放大器设计中,由于最低噪声系数和最大增益往往不能同时得到,在许多情况下不得不在第一级噪声系数与增益之间取折衷方案,以获得放大器较低的整机噪声系数。这就需要对微波晶体管增益性能与噪声性能之间关系进行分析,传统工程设计方法就是在一个频率点上根据给定的增益,在 Smith 圆图上作出等增益圆,再在等噪声族中找出与之相切的等噪声系数圆,确定对应的最小噪声系数,然后在其他频率点重复进行这个过程,以确定放大器能否在整个带宽内同时满足所要求的增益和噪声系数指标^[1,2]。若不满足,将选用其他晶体管器件或在增益指标和最大允许噪声系数指标之间作综合考虑,这是一个非常繁杂的设计过程。本文给出了噪声系数与增益之间关系的解析表达式,并对其解析解进行了讨论,所给表达式大大简化了上述设计过程。在每个频率点上,可以根据预定的增益指标求出相应的最小噪声系数,也可以根据预定的噪声系数指标求出相应的最大增益,这样就可以直接验证器件能否满足预定指标。在实际的微波宽带低噪声放大器设计中,采用此方法对微波低噪声 HEMT 器件 JS-8905AS 进行了分析设计,经验证,与传统方法的结果一致。

1 理论基础

由微波放大器基本理论可知,当信号源反射系数为 Γ_S 时,放大器噪声系数为^[3,4]

$$F = F_{\min} + \frac{4r_n |\Gamma_S - \Gamma_{\text{opt}}|^2}{(1 - |\Gamma_S|^2) |1 + \Gamma_{\text{opt}}|^2} \quad (1)$$

式中 $F_{\min}, r_n, \Gamma_{\text{opt}}$ 为器件噪声参量。

令

$$N = \frac{|\Gamma_S - \Gamma_{\text{opt}}|^2}{1 - |\Gamma_S|^2} = \frac{F - F_{\min}}{4r_n |1 + \Gamma_{\text{opt}}|^2} \quad (2)$$

将式(2)整理,可得

$$\left| \Gamma_S - \frac{\Gamma_{\text{opt}}}{1 + N} \right| = \frac{N^2 + N(1 - |\Gamma_{\text{opt}}|^2)}{(1 + N)^2} \quad (3)$$

1996年 12月 10日收稿

* 电子部预研基金资助项目
** 男 27岁 博士生

式 (3) 确定了一簇称之为等噪声系数圆的圆, 在 Smith 圆图上, 每个圆代表相同噪声系数的源阻抗的轨迹, 其圆心 C_F 和半径 R_F 为

$$C_F = \frac{\Gamma_{\text{opt}}}{1 + N} \quad (4)$$

$$R_F = \frac{1}{1 + N} \sqrt{N^2 + N(1 - |\Gamma_{\text{opt}}|^2)} \quad (5)$$

当信号源反射系数为 Γ_S 时, 放大器资用功率增益 G_u 为

$$G_u = \frac{|S_{21}|^2 (1 - |\Gamma_S|^2)}{1 - |S_{22}|^2 + |\Gamma_S|^2 (|S_{11}|^2 - |\Delta|^2) - 2\text{Re}(C_1 \Gamma_S)} \quad (6)$$

式中 $\Delta = S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21}$

$$C_1 = S_{11} - \Delta S_{22}^* \quad (7)$$

相类似地, 经过推导可得到一族等资用功率增益圆, 其圆心 C_a 和半径 R_a 为

$$C_a = \frac{g_a C_1^*}{1 + g_a (|S_{11}|^2 - |\Delta|^2)} \quad (9)$$

$$R_a = \frac{(1 - 2K |S_{12}S_{21}| g_a + |S_{12}S_{21}|^2 g_a^2)^{1/2}}{|1 + g_a (|S_{11}|^2 - |\Delta|^2)|} \quad (10)$$

式中 g_a 为归一化资用功率增益; K 为放大器稳定系数

$$g_a = G_u / |S_{21}|^2 \quad (11)$$

$$K = \frac{1 - |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2 + |\Delta|^2}{2 |S_{12}S_{21}|} \quad (12)$$

2 对于给定的资用功率增益 G_a 求相应的最小噪声系数 F

对于一给定的增益 G_u , 即确定了一对应的等增益圆, 由等增益圆和等噪声圆性质可知, 相应的最小噪声系数圆必然与之相切^[5], 所以

$$|C_F - C_a| = |R_F \pm R_a| \quad (13)$$

将式 (4) 代入式 (5), 得

$$R_F^2 = \frac{N}{1 + N} - N |C_F|^2 \quad (14)$$

将式 (3) 和式 (14) 代入式 (13), 结合复数恒等式 $|x \pm y|^2 = |x|^2 \pm xy^* \pm x^*y + |y|^2$, 化简得到关于 N 的二次代数方程

$$A_2 N^2 + 2A_1 N + A_0 = 0 \quad (15)$$

其中

$$A_2 = (|C_a|^2 - R_a^2 - 1)^2 - 4R_a^2 \quad (16)$$

$$A_1 = (|C_a|^2 - R_a^2 - 1)(|\Gamma_{\text{opt}} - C_a|^2 - R_a^2) + 2R_a^2 (|\Gamma_{\text{opt}}|^2 - 1) \quad (17)$$

$$A_0 = (|\Gamma_{\text{opt}} - C_a|^2 - R_a^2)^2 \quad (18)$$

将解得的 N 值代入式 (2), 可得相对于 G_u 的最小噪声系数 F

3 对于给定的噪声系数 F 求相应的最大资用功率增益 G_a

同理, 对于确定的等噪声系数圆, 相对应的最大资用功率增益圆也必然与之相切, 它们之间也满足式 (13) 为了化简方便, 令

$$X = \frac{g_a}{1 + g_a (|S_{11}|^2 - |\Delta|^2)} \quad (19)$$

代入式 (9) (10) 化简, 得

$$C_a = C_1 X \quad (20)$$

$$R_a = (|C_1|^2 X^2 - B_1 X + 1)^{1/2} \quad (21)$$

式中

$$B_1 = 1 + |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2 - |\Delta|^2 \quad (22)$$

将式 (20) (21) 代入式 (13), 同样也化简成关于 X 的二次方程

$$A_2 X^2 + 2A_1 X + A_0 = 0 \quad (23)$$

其中

$$A_2 = 4R_F^2 |C_1|^2 - (2\text{Re}(C_F C_1) - B_1)^2 \quad (24)$$

$$A_1 = 2\text{Re}(C_1 C_F) (|C_F|^2 - R_F^2 - 1) - B_1 (|C_F|^2 + R_F^2 - 1) \quad (25)$$

$$A_0 = 4R_F^2 - (|C_F|^2 - R_F^2 - 1)^2 \quad (26)$$

将解得的 X 值代入式 (19) (11), 可得到对应于 F 的最大资用功率增益 G_u

4 解的判断准则

式 (15) 和式 (23) 都存在两个解, 它们都满足式 (13), 但不一定都满足放大器的实际工作状态, 必须利用放大器的性质以及稳定性进行判断, 选择一最佳值。下面对噪声系数解 N 和增益解 X 分别进行讨论

4.1 噪声系数解的选择

由于实际放大器的噪声系数必然大于晶体管器件本身的最小噪声系数 F_{\min} , 由式 (2) 可知

$$N \geq 0 \quad (27)$$

因此式 (15) 的负根应舍去。从上面分析可知, 由式 (15) 的解可以确定相应的最小噪声系数圆 (C_F, R_F), 结合已知增益圆 (C_a, R_a), 可得到切点 Γ_S

$$\begin{cases} \Gamma_S = C_F - \frac{C_a - C_F}{|C_a - C_F|} R_F & \text{当 } |C_a - C_F| \leq R_a \text{ 且 } R_F \leq R_a \\ \Gamma_S = C_F + \frac{C_a - C_F}{|C_a - C_F|} R_F & \text{其他情况} \end{cases} \quad (28)$$

以及放大器输入端口反射系数 Γ_{in}

$$\Gamma_{in} = \frac{S_{22} - \Delta \Gamma_S}{1 - S_{11} \Gamma_S} \quad (29)$$

Γ_S 和 Γ_{in} 必须满足稳定性条件

$$\begin{cases} |\Gamma_S| < 1 \\ |\Gamma_{in}| < 1 \end{cases} \quad (30)$$

否则放大器处于不稳定状态, 得到的解无意义。

4.2 增益解的选择

对等增益圆式 (9) (10) 进行分析可知, g_a 越大, R_a 越小, 当 $R_a = 0$ 时, g_a 达到其最大值 g_{am} , 由式 (10) 令 $R_a = 0$, 即得 g_{am} 为

$$g_{am} = \frac{1}{|S_{21} S_{12}|} (K \pm \sqrt{K^2 - 1}) \quad (31)$$

由于放大器绝对稳定, 所以式 (31) 根号前取负号。由式 (23) 得到的 g_a 必须小于 g_{am} 。同时, 由 g_a 确定等增益圆 (C_a, R_a), 由式 (28) (29) 可得到 Γ_S 和 Γ_{in} , 它们也必须满足稳定性条件式 (30)。

必须指出, 以上分析和讨论对于绝对稳定的放大器是完全适用的, 但对于条件稳定的放大器, 得到的解有可能落在不稳定区内, 这时在程序中应加入稳定性条件, 应用逐点搜索法得到数值解。

5 设计实例

本文对微波低噪声 HEMT 器件 JS8905-AS 进行了分析,图 1 为对于几个给定增益值所对应的最小噪声系数。图 2 为对于几个给定噪声系数值所对应的最大增益。从图 1 可以看出,要使噪声系数在 1.5 dB 以内,增益 $G \geq 9$ dB,器件只能工作在 18 GHz~20 GHz 频带内;而从图 2 可以发现,在 18 GHz~26 GHz 全频带内,器件最大可以达到增益 9 dB,噪声系数 $F \leq 1.5$ dB 的指标

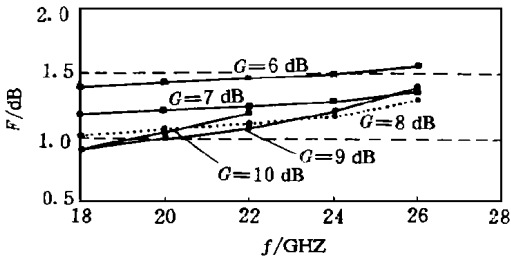


图 1 对应于确定增益值的最小噪声系数

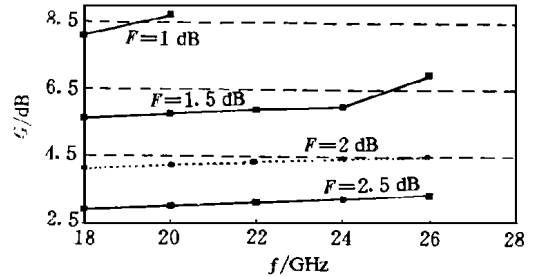


图 2 对应于确定噪声系数的最大增益

6 结论

本文提出的解析表达式可以直接应用于微波宽带低噪声放大器的设计中,用器件已知的 S 参量和噪声参量评价器件的增益性能和噪声性能,具有速度快、精度高等优点。必须指出,该解析式适用于绝对稳定放大器,而对于某些条件稳定放大器,则要求采用数值方法分析。

参 考 文 献

- 1 哈 Tri T. 固体微波放大器设计. 北京:国防工业出版社,1988
- 2 陈天麒. 微波低噪声晶体管放大器. 北京:人民邮电出版社,1983
- 3 Fukui H. Available power gain, noise figure, and noise measure of two port and their graphical representation. IEEE Trans Circuit Theory, 1966, CT-13: 137~142
- 4 Poole C R, Paul D K. Optimum noise measure terminations for microwave transistor amplifiers. IEEE Trans Microwave Theory Tech, 1985, MTT-33(11): 1254~1257
- 5 Link Garry N, Gudimetla V S Rao. Analytical expressions for simplifying the design of broadband low noise amplifiers. IEEE Trans Microwave Theory Tech, 1995, MTT-43(10): 2498~2501

An Analytical Method for Gain and Noise Figure of Microwave Amplifier

Yan Bo Xu Jin Xue Liangjin

(Inst. of Applied Physics, UEST of China Chengdu 610054)

Abstract An analytical expression for the relationship between gain and noise figure is derived for the design of the microwave broadband low noise transistor amplifier in this paper. The characteristic of analytical solutions is discussed in detail, which simplifies the empirical design method. The microwave low noise HEMT is also analyzed and the results are in agreement with those gained by empirical method.

Key words microwave low noise amplifier; gain; noise figure; analytical expression

编辑 徐培红