

微波 BJT 器件噪声参数的抽取

刘章文^{1,2}, 古天祥¹

(1. 电子科技大学自动化工程学院, 四川成都 610054; 2. 中物院应用电子学研究所, 四川绵阳 621900)

摘 要: 对微波 BJT 器件的级联噪声模型 ($E_n - I_n$) 以及噪声参数的提取进行了研究. 从复相关理论出发, 求得噪声参数 F_{\min} , R_n 和 ρ_{opt} 的表达式. 根据二端口器件的本征 H 参数和噪声源配置, 推出了 $E_n - I_n$ 模型的表达式方程. 将 $E_n - I_n$ 代入噪声参数的表达式中即完成了对噪声参数的抽取. 后给出器件 AT41410 和 AT41411 噪声参数抽取结果, 并与实测值进行比较, 结果表明提取值与测量值基本上一致.

关键词: 噪声测量; BJT; $E_n - I_n$ 模型; 复相关

中图分类号: TN925 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2004) 08-1396-03

Extracting Noise Parameters of Microwave BJT Device

LIU Zhang-wen^{1,2}, GU Tian-xiang¹

(1. Institute of Automatic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China;

2. Institute of Applied Electronics, CAEP, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract: The cascade noise model ($E_n - I_n$) and the noise parameters extraction of microwave BJT device were studied. Using the complex correlation theory, the expressions of the noise parameters F_{\min} , R_n , ρ_{opt} were obtained. According to the intrinsic H parameters and noise source configuration of the two-port device, the $E_n - I_n$ model equations are determined. By substituting the $E_n - I_n$ equations into the noise parameters expressions, the noise parameters are extracted. The experiments on the two devices AT41410 and AT41411 show that the results extracted are almost in accord with the values measured.

Key words: noise measurement; BJT; $E_n - I_n$ Model; complex correlation

1 引言

在微波放大器应用中,特别是雷达接收机的前端,双极性低噪声固态晶体管 (BJT) 是用得较广泛的有源二端口器件之一. 而此位置的放大器主要是放大微弱的微波信号,器件的噪声特性要求比较苛刻. 对低噪声设计,器件噪声参数是必需的,即最小噪声系数 F_{\min} , 等效噪声电阻 R_n 及最佳源匹配反射系数 ρ_{opt} (包括幅度和相位). 尽管 R. J. Hawkins^[1] 和 H. Fukui^[2] 等提出了 BJT 器件的噪声系数表达式,并对提取噪声参数作了一定的研究,但实现很困难. 传统的噪声参数测量方法^[3,4] 是基于选择至少四个源阻抗,在输入端设置微波通道切换开关,其代价是比较昂贵的. 本文提出一种直接从 S 参数中抽取噪声参数的方法,不需要微波通道的切换.

2 二端口网络噪声理论

将内部含有噪声源的二端口网络等效为一个无噪声的在输入端接入等效噪声源的二端口网络,该等效噪声源的级联形式表示为均方电压 E_n 和均方电流 I_n , 即 $E_n - I_n$ 模型^[5], 如图 1 所示. 由于网络中存在复阻抗,故 E_n 和 I_n 是复相关的,

若源阻抗 $Z_s = R_s + jX_s$, 则等效输入源端噪声为:

$$E_{ni}^2 = E_{ns}^2 + (E_n + I_n Z_s)^2 = E_{ns}^2 + E_n^2 + I_n^2 Z_s^2 + E_n I_n (Z_s^* + Z_s) \quad (1)$$

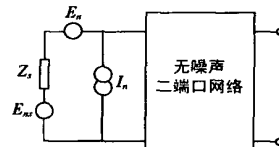


图 1 复源复相关二端口噪声等效图

为 E_n 与 I_n 的复相关系数,

$$\rho = \frac{E_n I_n^*}{(E_n I_n)}, \text{ 上画线为取均值. 将源阻抗热噪声 } E_{ns}^2 = 4kTR_s f \text{ 代入噪声系数定义}^{[6]} \text{ 得:}$$

$$F = \frac{E_{ni}^2}{E_{ns}^2} = 1 + \operatorname{Re} \left(\frac{E_n I_n}{2kTf} \right) + \frac{I_n^2 R_s}{4kTf} + \frac{I_n^2}{4kTf} \left(\frac{E_n^2}{I_n^2} + X_s^2 \right) + 2 \operatorname{Im} \left(\frac{E_n X_s}{I_n} \right) \quad (2)$$

为求 F_{\min} , 分别求 $\partial F / \partial R_s = 0$ 和 $\partial F / \partial X_s = 0$ 即得最佳源阻抗

$$Z_{opt} = R_{opt} + jX_{opt} = E_n \sqrt{1 - \operatorname{Im}^2(\rho)} / I_n - j \operatorname{Im}(\rho) E_n / I_n \quad (3)$$

最佳匹配时反射系数 (Z_0 为特性阻抗) 为:

$$\rho_{opt} = \frac{Z_{opt} - Z_0}{Z_{opt} + Z_0} \quad (4)$$

此时求得最小噪声系数为:

$$F_{\min} = 1 + [\sqrt{1 - \text{Im}^2(\cdot)} + \text{Re}(\cdot)] E_n I_n / (2KTf) \quad (5)$$

同时,由二端口网络的噪声系数表达式

$$F = F_{\min} + R_n | Y_s - Y_{opt} |^2 / G_s \quad (6)$$

其中 $Y_s = 1/Z_s = G_s + jB_s$ 为源导纳,推出等效噪声电阻为

$$R_n = | Z_{opt} |^2 I_n / (4KTf) = G_n | Z_{opt} |^2 \quad (7)$$

式(4),(5)和(7)即为二端口器件的全部噪声特性参数.从上面分析可知,要求得噪声参数,器件的 $E_n - I_n$ 模型是关键.

3 $E_n - I_n$ 噪声模型及参数抽取

图 2 为微波 BJT 共射集本征混合 噪声等效电路简化模型.从图中看出,模型中各噪声源配置为:源等效热噪声 E_{ns}^2 ;基集热噪声 E_{nb}^2 ;基集和集电集散粒噪声 I_{nb}^2 和 I_{nc}^2 ;集电集分配噪声 I_{ncp}^2 .它们分别表达如下:

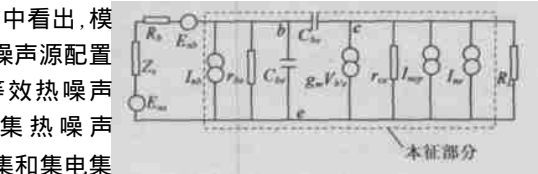


图 2 混合噪声模型

其中 I_{nc}^2 和 I_{ncp}^2 合并为(设各噪声源间相互独立)

$$E_{ns} = 4KTR_s f \quad E_{nb} = 4KTR_b f \quad I_{nb}^2 = 2qI_b f \quad (8)$$

$$I_{nc}^2 = 2qI_c f \quad I_{ncp}^2 = 2qI_c(1 - |\alpha|)^2 f$$

要求得 $E_n - I_n$ 模型,需先求等效源端输入噪声 E_{ni} .对于微波器件,直接可测的是 S 参数(包括各管脚的寄生元件的影响),通过剥离技术^[7],寄生部分很容易剔除.寄生元件可以通过直流测量获得寄生电阻;可以在片上短接 BJT 的三极后,再测出其 S 参数,从该 S 参数中抽取出电容电感来^[8].剔除寄生部分后再变换到 H 参数.利用本征 H 参数的电流增益 h_{21} 将输出端噪声源 I_{no} 等效到源阻抗上(看图 2 所示的输入回路)得:

$$E_{ni}(I_{no}) = I_{no}(h_{11} + Z_s + R_b) / h_{21} \quad (9)$$

于是将所有的噪声源都等效到源阻抗上得:

$$E_{ni} = E_{ns} + E_{nb} + I_{nb}(Z_s + R_b) + E_{ni}(I_{no}) \quad (10)$$

利用极限法,将 $Z_s = 0$ 代入式(10),即得表达式 E_n ,当 Z_s 时求得 $I_n = E_{ni} / Z_s$,故 $E_n - I_n$ 模型为:

$$\begin{cases} E_n = E_{nb} + I_{nb}R_b + (R_b + h_{11}) I_{no} / h_{21} \\ I_n = I_{nb} + I_{no} / h_{21} \end{cases} \quad (11)$$

将式(8)和式(9)代入式(12),并用均方表示,且考虑式(8)和式(9)表示的噪声源相互独立,故其均方值可直接相加:

$$E_n^2 = [4KTR_b + 2qI_b R_b^2 + 2qI_c (R_b + h_{11}) / |h_{21}|^2 (2 - \frac{0}{|2|})] f$$

$$I_n^2 = [2qI_b + 2qI_c (2 - |\alpha|)^2 / |h_{21}|^2] f \quad (12)$$

上式中 I_b 和 I_c 为静态值,易测量,工作在线性区时有 $I_c = 0I_b$; T 为绝对温度,常取 $T = 300K$; K 与 q 分别为波尔兹曼常数和单位电荷; f 为噪声带宽,通常取 $f = 1Hz$,即单位频率带宽的物理量; R_b 为基极电阻,是对噪声特性影响很大的一个参数,文献[9]中对测量 R_b 和截止频率 f 的方法进行了研

究; $|\alpha| = \omega / \sqrt{1 + f^2/f_c^2}$,根据文献[9], $f = f_T / \omega = f / \omega$,静态电流增益 β_0 很容易测得,本文设为已知数.通过这些处理,式(12),(13)由 H 参数完全确定,它反映二端口器件的本征噪声特性,即噪声功率谱密度,它的直接测量可用文献[6]所述的方法加以改进实现.因该方法只适用于低频段,扩展到微波段时,必须用专门夹具,用微带线将器件射频管脚引到相应同轴接头上,并在相应的输出端接匹配阻抗.

求出 $E_n - I_n$ 模型后,将式(12),(13)代入式(4),(5),(7)即可求出噪声参数为:

$$X_{opt} = - \frac{\omega(2 - |\alpha|)^2 / |h_{21}|^2 \text{Im}(h_{11} + R_b)}{1 + \omega(2 - |\alpha|)^2 / |h_{21}|^2} \quad (14)$$

$$R_{opt} = \sqrt{\frac{2R_b r_e \omega + R_b^2 + |h_{11} + R_b| / |h_{21}|^2 \omega(2 - |\alpha|)^2}{1 + \omega(2 - |\alpha|)^2 / |h_{21}|^2}} - X_{opt}^2 \quad (15)$$

其中 $r_e = KT / (qI_c)$,再令 $G_n = [1 + \omega(2 - |\alpha|)^2 / |h_{21}|^2] / (2r_e \omega)$,则得

$$F_{\min} = 1 + 2G_n R_{opt} + R_b / (r_e \omega) + \text{Re}(h_{11} + R_b) \cdot (2 - |\alpha|)^2 / (|h_{21}|^2 r_e) \quad (16)$$

$$R_n = G_n (X_{opt}^2 + R_{opt}^2) \quad (17)$$

最佳匹配反射系数 Γ_{opt} 根据式(4),(14),(15)很容易求得.

4 器件实测分析及结论

对两种 BJT 器件抽取的噪声参数分别示于图 3 和图 4

(100MHz ~ 4GHz). 器件 AT41410 测试条件为 $V_{ce} = 8.00V$, $I_c = 10.03mA$,并测得 $R_b = 6.8 \Omega$, $\beta_0 = 150$, $f_T = 40MHz$; 器件 AT41411 测试条件为 $V_{ce} = 8.00V$, $I_c = 10.00mA$,并测得 $R_b = 7.1 \Omega$, $\beta_0 = 150$, $f_T = 36MHz$.图中同时给出了两器件用文献[4]的方法进行的直接参数测量值.

从上面数据看出,提取值与实测值基本上一致.对于 F_{\min} 和 R_n ,频率越大,误差就越大,这主要是电流增益 $|h_{21}|$ 随频率增大而减小,而 R_{opt} 却相反.且本文采用图 2 所示的噪声模型,忽略了集电集和发射集寄生热噪声和基、集电级散粒噪声源的相关性,

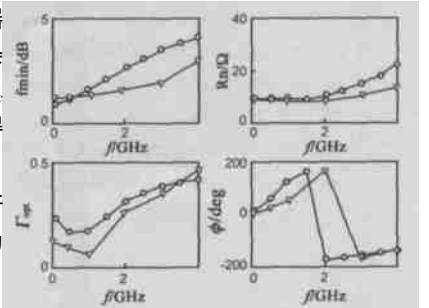


图 3 器件 AT41410 噪声参数测量随频率变化图 (▽) ——直接测量值; (→) ——本文提取值)

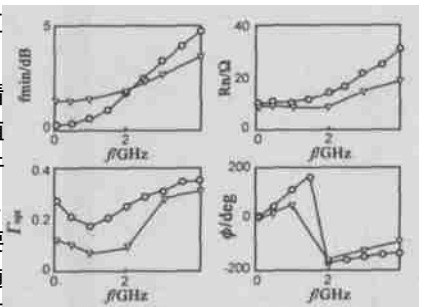


图 4 器件 AT41411 噪声参数测量随频率变化图 (▽) ——直接测量值; (→) ——本文提取值)

上面误差也在所难免.

从式(12), (13)看出,影响器件噪声功率的参数主要是基极电阻 R_b (器件工艺结构因素), 静态电流 I_c (外部因素), 输入阻抗 h_{11} 和电流增益 h_{21} . 根据晶体管的知识, h_{11} (实部) 实际由 I_c 确定, 故不是单独的影响因子, 在低噪声设计时应注意考虑. 文中也包含重要结论: 微波 BJT 二端口器件的等效噪声电路模型和 S 参数确定了它的全部噪声特性. 故只要器件噪声电路模型和 S 参数准确, 直接从 S 参数中提取噪声参数理论上也是完全可能的.

在更准确的测量中, 发射集和集电极分别有 $4 KTR_E f$ 和 $4 KTR_C f$ 的热噪声, 可通过级联关系分别等效到式(11)中, 该计算过程很复杂, 且精度影响甚微, 故文中省去该部分. 本文假设所有噪声源都是彼此独立的, 实际上由于反馈电容 C_{bc} 的影响, 基极散粒噪声 I_{nb} 和集电极合成噪声 I_{no} 具有弱相关性^[2], 且随频率的增加该相关性越来越强. 但在 BJT 器件的线性放大频段内该相关性很小完全不用考虑.

与文献[4]相比, 本文直接从微波 BJT 器件的 S 参数中提取噪声的 $E_n - I_n$ 模型和噪声参数, 方法简单, 本征元件值不必求解, 省去了四个微波输入通道切换的麻烦, 且在一定的范围内精度保证, 对测试仪器的研制和低噪声电路设计提供了一定的理论根据.

参考文献:

- [1] R J Hawkins. Limitation of Nielsens and related noise equations Applied to microwave Bipolar transistor and new expression for the frequency and current dependent noise figure[J]. Solid-State Electronics, 1977, 20:191 - 196.
- [2] H Fukui. The noise performance of microwave transistors[J]. IEEE Trans Electr Devices, 1966, ED-13:329 - 341.
- [3] G Vasilescu, G Alquie, M Krim. Exact computation of two-port noise parametes[J]. Electron. Lett, 1989, 25(4):292 - 293.
- [4] RICHARD Q Lane. The Determination of device noise parameters[J]. Proc IEEE, 1969, 57:1461 - 1462.
- [5] 王军. 低噪声放大器模块化分析与设计的等效噪声模型法[J]. 电子学报, 2000, 28(3):81 - 83.
- [6] 方自豪. 晶体管低噪声电路[M]. 北京: 科学出版社, 1984. 15 - 16, 492 - 498.
- [7] G Dambrine, A Copy, F Heliodore, E Playez. A new method for determining the FET small-signal equivalent circuit [J]. IEEE Trans Microwave Theory Tech, 1988, 36(7):1151 - 1159.
- [8] K Hartmann, W Köttyczka, M j O. Strutt, Equivalent networks for three different microwave bipolar transistor packages in the 2 - 10GHz range [J]. Electronics Letters, 1971, 7(18):510 - 511.
- [9] Willy M C. Sansen, Robert G Mayer. Characterization and measurement of the base and emitter resistances of bipolar transistors[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 1972, SC-7(6):492 - 498.

作者简介:



刘章文 男, 1968 出生, 四川大英人, 电子科技大学测试计量技术及仪器学科博士生, 目前从事光电检测及微波测量工作, 现主要方向为微波器件的测量研究.

古天祥 男, 1939 出生, 电子科技大学教授, 博导, 从事测试与控制、仪器仪表、数据采集、网络化测试、计算机应用等领域的教学、科研工作, 主持科研项目 30 多项, 其中获全国、省部级科技进步奖共 6 项, 发表论文 70 余篇, 编著教材 10 余种.