

# 微波振荡器相位噪声的非线性电流源分析法<sup>\*</sup>

徐锐敏<sup>\*\*</sup> 延波 谢俊

(电子科技大学应用物理所 成都 610054)

**【摘要】** 提出了一种微波场效应晶体管振荡器相位噪声新的分析方法,该方法利用非线性电流源法分析振荡器基波和各次谐波的稳态响应和相位噪声特性,把稳态响应分析与相位噪声分析有机统一起来,便于微波振荡器综合性能的 CAD 优化设计。经验证,计算机辅助分析结果与传统分析方法的结果相一致,证明了该方法的正确性。

**关键词** 微波场效应晶体管; 振荡器; 相位噪声; 非线性电流源法

中图分类号 TN751.32

相位噪声是微波振荡器的一个重要技术指标,但对其精确分析一直是一个未能很好解决的问题。相位噪声是由于振荡器电路中的低频噪声调制到载波上,在载波附近形成噪声边带。关于相位噪声的产生根源,经过长期研究,认为主要是由于加性热噪声和调制噪声引起<sup>[1]</sup>。1/f 噪声是相位噪声的主要来源,因此振荡器一般选用 1/f 噪声低的器件。

振荡器相位噪声分析的研究方法可以分为两类:1)经验或半经验分析法,2)非线性分析法。第一种分析方法是利用基本的噪声测量结果,根据经验公式进行线性分析,计算振荡器的相位噪声。这种方法由于不能准确考虑振荡器电路的非线性特性,所以只能作为一种近似分析手段。第二种分析方法是通过对振荡器电路精确的非线性分析,求得准确的相位噪声参数。例如文献[2]提出的单口网络分析法,文献[3]提出的双口网络分析法。但是,文献[2]分析相位噪声时,有许多相关参数需要预先测定,不便于工程应用;文献[3]的双口网络分析法比较有效,但不便用来分析振荡器多次谐波附近的相位噪声特性。另外,这些方法分析振荡器相位噪声和稳态响应(输出的功率和振荡频率)的过程是互相独立的,没有统一,不适合于振荡器的优化设计。

本文提出的方法利用非线性电流源法分析振荡器基波和各次谐波的稳态响应和相位噪声特性,把稳态响应分析与相位噪声分析有机统一起来,便于微波振荡器综合性能的 CAD 优化设计。

## 1 理论分析

图 1 为微波振荡器的相位噪声反馈模型。振荡电路可看做具有两个激励的无噪声放大器和反馈网络组成。激励是由基波和谐波谐振网络反馈来的信号,以及输入端等效低频噪声电流激励源组成。由于振荡器的非线性特性,低频噪声信号调制到基波及其谐波上,从而在基波以及各次谐波附近形成噪声边带,即相位噪声。

由于噪声激励信号远小于基波信号,所以我们可利用非线性电流源法进行分析。

1)暂不考虑噪声电流源激励,采用非线性电流源法求解振荡器的稳态响应。

图 2a 为微波 FET 振荡器原理电路, $Z_g(\omega)$ 、 $Z_s(\omega)$ 和  $Z_d(\omega)$ 分别为栅、源和漏极的端接阻抗, $Z_L(\omega)$ 为负载阻抗,图 2b 为图 2a 的非线性等效电路,其中虚线框中是 FET 的非线性等效电路模型。

假定非线性元件  $C_{gs}$ 、 $C_{dg}$ 、 $C_{ds}$ 、 $I_{gs}$ 、 $I_{dg}$ 和  $I_{ds}$ 的非线性关系为

$$Q_{gs}(V_{gs}) = \sum_{k=1}^N C_{gsk} V_{gsk} \quad (1)$$

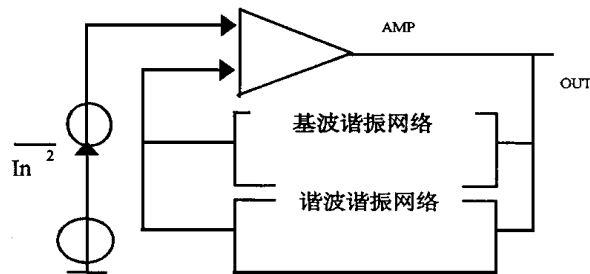


图 1 微波振荡器的相位噪声反馈模型

$$Q_{ds} (V_{dg}) = \sum_{k=1}^N C_{dgk} V_{dgk} \quad (2)$$

$$Q_{gs} (V_{ds}) = \sum_{k=1}^N C_{dsk} V_{dsk} \quad (3)$$

$$I_{gs} (V_{gs}) = \sum_{k=1}^N C_{gsk} V_{gsk} \quad (4)$$

$$I_{dg} (V_{gd}) = G_{dgk} V_{gd} \quad (5)$$

$$I_{ds} (V_{gs}, V_{ds}) = \sum_{k=1}^N (G_{mk} V_{gsk} + G_{dsk} V_{dsk}) \quad (6)$$

式中  $C_{gsk}, C_{dgk}, C_{dsk}, G_{dgk}, G_{mk}, G_{gsk}$  和  $G_{dsk}$  ( $k=1 \sim N$ ) 通过对 FET 进行  $Q/V, I/V$  特性测量并作数据拟合而求得。 $Z_{in}, Z_s$

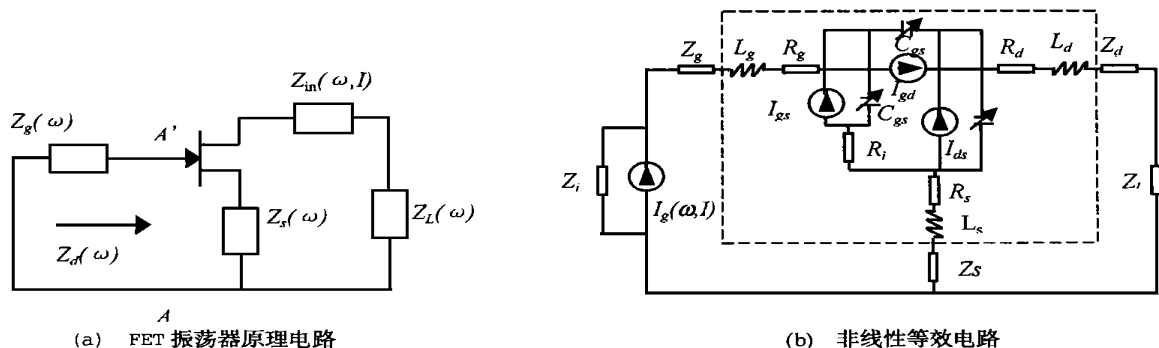


图 2 FET 振荡器电路图

图 2b 中的  $I_g(I, \omega)$  是一个虚拟的理论电流源, 其频率  $\omega$  和幅度  $I$  都是未知量,  $Z_i(\omega)$  为一个理想阻抗, 从图 2a  $AA'$  处往右看的输入阻抗为  $Z_{in}$ , 它必然是  $\omega$  和  $I$  的非线性函数, 则输入谐振器回路的阻抗为

$$Z(\omega, I) = Z_g(\omega) + Z_{in}(\omega, I) \quad (7)$$

根据起振条件, 在基波和各次谐波处,  $Z(\omega, I)$  应满足

$$\text{Im} [ Z(m f_0, I) ] = 0 \quad (8)$$

$$\text{Re} [ Z(m f_0, I) ] < 0 \quad (9)$$

进入稳态时, 应当满足振荡平衡条件

$$Z(m f_0, I) = 0 \quad (10)$$

式中  $m=1 \sim M, M$  为考虑的最大谐波次数,  $f_0$  是振荡频率。利用起振条件式(8)、(9), 可以在一个大频率范围内作扫频分析, 搜索负阻带求出近似振荡频率, 然后利用振荡平衡条件求解非线性方程(10), 就能得到精确的振荡频率和振幅, 进一步可以求得基波和各次谐波的输出功率。

2) 求得振荡器的稳态响应后, 加入低频噪声电流源激励, 利用非线性电流源法求得噪声边带响应, 从而确定相位噪声特性。

由稳态响应分析中求得的基波和各谐波电压分量  $V(k f_0)$  ( $k=1 \sim M$ ) 相应的输出功率  $P_s(k f_0)$ , 利用非线性电流源法可以得到在噪声电流源激励下的一阶电压分量  $V_n(f_m)$ , 一般忽略高阶响应, 其中  $f_m$  为低频噪声频率, 即距离载波的频偏。此时电路中的总响应电压为  $V(k f_0) + V_n(f_m)$ , 根据非线性电流源法, 可求得电路中的二阶非线性电流源  $I_{2n}(k f_0 \pm f_m)$ , 进一步可求得二阶电压  $V_{2n}(k f_0 \pm f_m)$ , 即噪声边带电压。

此外, 还须考虑振荡器基波和谐波网络的选频作用。假设传递函数为

$$H(f_m) = [1 + j2f_m Q_L(kf_0)/(kf_0)]^{-1} \quad k=1 \sim M \quad (11)$$

式中  $Q_L(kf_0)$  为第  $k$  次谐波处振荡器的有载品质因数。根据单边带相位噪声的定义: 单边带噪声比  $L(f_m)$  等于单边带距离载波频偏  $f_m$  为 1Hz 处带内的相位噪声功率与载波输出功率的比值。所以可以求得微波振荡器输出端基波和各次谐波处的相位噪声

$$L(f_m) = \frac{P_{ssb}(kf_0 \pm f_m)}{P_s(kf_0)} \left| \frac{H(f_m)}{1 - H(f_m)} \right| = \frac{P_{ssb}(kf_0 \pm f_m)^2}{P_s(kf_0)} [kf_0 / (2f_m Q_L(kf_0))]^2 \quad (12)$$

## 2 分析举例

根据以上方法, 本文编制出微波振荡器相位噪声 CAA 软件, 由文献 4] 给出的电路参数进行了分析计算。图 3 为分析得到的振荡器基波附近的相位噪声随频偏  $f_m$  变化特性曲线。图中曲线有一个拐点, 对应频率为  $f_c$ , 在  $f < f_c$  时,  $L(f_m)$  随  $f_m$  变化规律为每十倍频程下降约 30 dB; 在  $f > f_c$  时, 为每十倍频程下降约 20 dB。这一结果与经典的理论分析报道是一致的<sup>[4]</sup>, 说明本文方法是正确的。

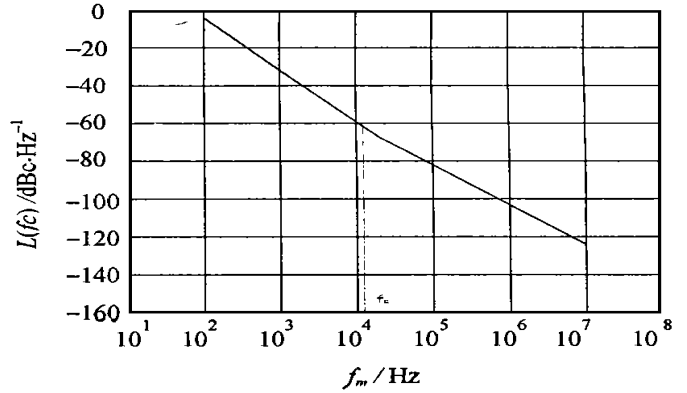


图3 近载相位噪声特性曲线

## 3 结束语

相对于谐波平衡法和 Volterra 法分析微波振荡器的相位噪声, 非线性电流源法的结果更为理想, 它将微波振荡器稳态响应分析与相位噪声分析有机地统一, 可以进行综合性能的 CAD 优化设计。此外, 还可分析各种微波振荡器在基波和各次谐波附近的相位噪声特性。

### 参 考 文 献

- 1 Packer T E. Characteristics and sources of phase noise in stable oscillators. 42nd Annual Frequency Control Symposium, 1987; 99 ~ 110
- 2 Debney B T, Joshi J S. A theory of noise in GaAs FET microwave oscillators and its experimental verification. IEEE Trans on ED, 1983, ED-30(7): 769 ~ 776
- 3 Siweris H J, Schieck B. Analysis of noise upconversion in microwave FET oscillators. IEEE Trans Microwave Theory Tech, 1985, MTT-133(3): 233 ~ 242
- 4 Sauvage G. Phase noise in oscillators: a mathematical analysis of Leeson's Model. IEEE Trans on IM, 1987, IM-26(4): 408 ~ 410
- 5 Cheng K K M. A new and efficient approach the analysis and design of GaAs MESFET microwave oscillators. IEEE MTT-S Digest, 1990; 1 283 ~ 1 286
- 6 Maas S A. Nonlinear microwave circuits. New York: Artech House, 1988

## Analysis for Phase Noise in Microwave Oscillator with Nonlinear Current Source Technique

Xu Ruimin    Yan Bo    Xie Jun

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

**Abstract** A new analysis for phase noise of microwave FET oscillator is given in this paper, which analyzes the steady respond and the phase noise property of the fundamental signal and every order harmonic with the nonlinear current source technique. It unifies the analyses of the steady respond and the phase noise, applied on microwave oscillator CAD. CAA results are agreed with empirical method results.

**Key words** microwave FET; oscillator; phase noise; nonlinear current source technique