

有源滤波器的非线性交调失真*

Nonlinear Intermodulation Distortion in Active Filters

曾学刚

(电子科技大学, 成都 610054)**

【摘要】 本文用频域交调波平衡法, 分析了有源滤波器的非线性交调失真, 计算和测量结果一致。

关键词: 非线性电路, 有源滤波器, 交调失真

Abstract: The nonlinear intermodulation distortion in active filter is analyzed using the intermodulation balance technique. The computed results agree well with the measurement.

Key words: Nonlinear circuits, Active filters, Intermodulation distortion

一、引 言

有源滤波器输出信号存在非线性失真^[1-4], 例如, 单频激励时产生谐波失真^[2,3], 多频激励时产生交调失真^[1,4], 谐波失真可用传统的谐波平衡法分析^[2], 交调失真的分析比较复杂, 要用改进的谐波平衡法等能够处理多频激励非线性电路的分析方法, 本文介绍用谐波平衡法分析有源滤波器非线性交调失真的步骤和结果。

交调波平衡法是近几年提出的一种非线性电路的频域分析方法^[5], 它的主要特点是对线性和非线性子电路的分析均在频域进行, 不需要对准周期信号进行傅立叶变换, 因此比通常的谐波平衡法简单, 对一个双频激励的二阶有源带通滤波器的分析验证了交调波平衡法分析有源滤波器交调失真的可行性和准确性。

二、交调波平衡分析

交调波平衡法分析有源滤波器非线性交调失真的主要步骤如下:

- (1) 用幂级数表示有源器件的非线性特性;
- (2) 用复矩阵表示电路变量;

(3) 确定各非线性特性的输入和输出之间的频域关系;

(4) 建立电路的交调波平衡方程;

(5) 求解电路的交调波平衡方程, 并计算非线性交调失真。

下面以一个双频激励的二阶带通有源滤波器为例, 讨论非线性交调失真的分析, 图 1 是有源滤波电路, 其中有源器件采用 $\mu A741$ 运算放大器, 其测量增益带宽积 $\omega_c = 2\pi \times 0.9 \times 10^6 \text{ rad/s}$, 转换速率为 $\rho = 0.625 \text{ V}/\mu\text{s}$, 运放的线性增益为 $A(j\omega)$, 输入饱和非线性, 为^[2,6]

$$v_n(t) = \frac{\rho}{\omega_c} \tanh\left[\frac{\omega_c}{\rho} v_n(t)\right] \quad (1)$$

其中, $v_n(t)$ 是运放的输入电压 $v_n(t)$ 是输入饱和和非线性的输出。

利用曲线拟合方法, 可把此非线性表示为

$$v_n(t) = \sum_{i=0}^N a_i v_n^i(t) \quad (2)$$

a_i 是幂级数系数。

利用文[8]中定义的复矩阵及其卷积算子 F 和式(2), 可推出运放的输入饱和和非线性在双频激励时输入和输出 $v_n(t)$ 之间的频域卷积关系

* 1994 年 7 月收到, 1995 年 2 月修改定稿, 国家自然科学基金和国家教委留学回国人员启动基金资助项目

** Zeng Xuegang (University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054)

$$[V_o(k, m)] = \sum_{r=0}^N a_r F_r\{[V_o(k, m)]\} \quad (4)$$

其中, $V_o(k, m)$ 和 $V_s(k, m)$ 分别是 $v_o(t)$ 和 $v_s(t)$ 在交调频率 $f = Kf_1 + mf_2$ ($k, m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$) 的复振幅, f_1 和 f_2 是双频激励信号的频率. 算子 F_r 的定义为^[8]

$$\begin{aligned} F_0\{[V_o(k, m)]\} &= I \\ F_1\{[V_o(k, m)]\} &= [V_o(k, m)] \\ F_2\{[V_o(k, m)]\} &= [V_o(k, m)] * [V_o(k, m)] \\ &\vdots \end{aligned} \quad (4)$$

图 1 电路存在下面的交调波平衡关系

$$V_o(k, m) = T_1(j\omega) \cdot V_s(k, m) - T_2(j\omega)V_o(k, m) \quad (5)$$

其中

$$V_o(k, m) = A(j\omega)V_s(k, m) \quad (6)$$

$T_1(j\omega)$ 和 $T_2(j\omega)$ 是两个传递函数, 可由线性电路理论得到, $\omega = 2\pi(kf_1 + mf_2)$. 如果考虑 M 个交调频率, 就存在 M 个交调波平衡关系式(5). 进一步可整理成由 $2M$ 个实变量非线性方程组成的非线性方程组. 由此非线性方程组的解可计算电路的非线性交调失真.

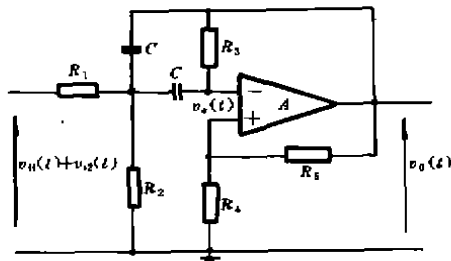


图 1 双频激励二阶带通有源滤波器电路

三、计算及测量结果

图 1 所示有源滤波器的中心频率为 $f_0 = 19.8\text{kHz}$, 品质因子 $Q = 5$, 带通增益为 13.9dB . 运放的输入饱和和非线性用一个 7 阶幂级数表示 ($N = 7$). 考虑 5 个交调波分量 ($M = 5$), $f_1, f_2, 2f_1 - f_2, 2f_2 - f_1$ 和 $3f_1$. 采用 NAG FORTRAN 程序库中的子程序 C05NBF 求解电路的交调波平衡方程^[7]. 图 2 给出图 1 电路在不等幅双频激励时非线性交调失真的计算和测量结果. 其中, 非线性交调失真的定义为

$$OD = \frac{\sum_{\substack{k \neq 1, m \neq 0 \\ k \neq 0, m \neq 1}} |V_o(k, m)|^2}{\sum_{\substack{k=1, m=0 \\ k=0, m=1}} |V_o(k, m)|^2} \quad (7)$$

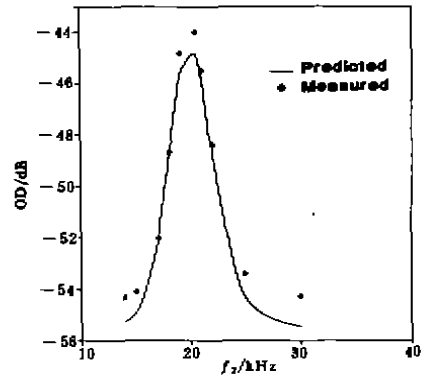


图 2 非线性交调失真的计算和测量结果 $V_{i1} = 0.5\text{V}$, $V_{i2} = 0.05\text{V}, f_1 = 19.8\text{kHz}$

用交调波平衡法得到的计算结果和测量结果一致. 图 3 是等幅双频激励时的非线性交调失真. 计算和测量结果也一致.

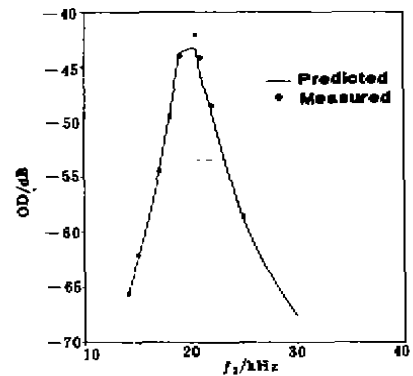


图 3 非线性交调失真的计算和测量结果 $V_{i1} = 0.2\text{V}$, $V_{i2} = 0.2\text{V}, f_1 = 19.8\text{kHz}$

交调波平衡法可以分析多频激励有源滤波器的非线性交调失真, 本文给出的只是一个简单的双频激励有源滤波器的分析结果.

参 考 文 献

- 1 A. Borys. On intermodulation and harmonic distortion in single-amplifier active filters. J. Audio Eng. Soc., Vol. 28, Part 10, 706-712, Oct., 1980
- 2 P. Bowron, M. R. J. Motlagh and A. A. Muhieddine. Harmonic characterisation of feedback systems incorporating saturation nonlinearities. Electronics Letters. Sept., 1991, 27(20): 1865-1867
- 3 A. Buonomo. Time-domain analysis of nonlinear circuits with periodic excitation. Electronics Letters, Jan., 1991, 27(1): 65-66
- 4 R. G. Meyer and R. Eschenbach. Cross modulation and intermodulation in amplifiers at high frequencies. IEEE Jul. Solid-State Circuits, SC-7(1): 16-23, Feb. 1972
- 5 X. Zeng. Frequency-domain-continuation inter-modulation balance method for the analysis of nonlinear microwave circuits with multifrequency excitations. IEE Proc. H, Microwaves, Antennas and Propagation, Aug., 1993, 40(4): 259-262
- 6 P. Bowron and F. W. Stephenson. Active Filters for Communications and Instrumentation. McGraw-Hill, Maidenhead, 1979
- 7 NAG FORTRAN LIBRARY, Mark 13, The Numerical Algorithm Group, Oxford, 1989
- 8 曾学刚, 吴万春. 复矩阵卷积算子 F. 科学通报, 77~78, 1991 年 1 月



曾学刚 1963 年 11 月生, 博士后, 副教授. 分别于 1984 年和 1987 年在西北工业大学获学士和硕士学位, 1990 年从西安电子科技大学获博士学位. 1990 年 8 月至 1992 年 6 月在电子科技大学作博士后. 1993 年 1 月至 4 月为香港中文大学访问学者, 1993 年 6 月至 1994 年 6 月为英国 Bradford 大学皇家客座研究员. 现为电子科技大学硕士研究生导师, 英国 IEE 和美国 IEEE 会员, 电子学会高级会员, 美国纽约科学院院士. 主要研究领域为非线性电路理论、微波电路 CAD, 电磁理论和通信技术等, 已发表论文 40 余篇, 获 1994 年度“国家教委科技进步一等奖(甲)”。