

## 2.8 无源混频器实验

### 一、实验目的

- (1) 进一步理解混频器的工作原理；
- (2) 掌握混频器基本参数的测量方法；
- (3) 进一步熟悉 Multisim 软件在分析与设计高频电路的性能方面的应用。

### 二、实验原理

#### 1、混频器的基本原理

混频器 (mixer) 是通信系统的重要组成部分, 被用于所有的射频和微波系统进行频率变换。这种频率变换应该保证原载频已调波的调制方式和所携带的信息不变。在发射系统中, 混频器用于上混频, 把已调制的信号的频谱搬移到射频频段用于发射; 在接收系统中一般用作下混频, 把接收的射频信号搬移到中频上, 然后进行解调。

混频器是一种频率变换器件, 理想混频器是把两输入信号在时域中相乘:  $A\cos\alpha * B\cos\beta = AB[\cos(\alpha+\beta) + \cos(\alpha-\beta)]$ , 根据不同的需要, 用滤波器滤除不需要的频率分量后提供给下一级电路。混频器为三端口器件。混频器有两个输入端: 分别为射频 (RF) 与本振 (LO, Local Oscillator) 信号, 一个输出端: 中频 (IF, Intermediate Frequency)。

中频频率  $f_i$  可以有两种关系式表达, 在发射机电路中通常取上混频信号, 即

$$f_i = f_L + f_R$$

在接收机电路中通常取下混频信号, 即

$$f_i = |f_R - f_L|$$

混频器可以分为两大类, 一类是无源混频器, 常见的有单二极管混频电路、二极管平衡混频电路、双平衡类型的二极管环形混频器等; 另一类是有源混频器, 常见的有三极管混频电路、单平衡混频电路、吉尔伯特单元混频电路等。

#### 2、无源混频器

无源混频器通常由非线性器件或开关元件构成, 电路简单。无源混频器不能提供变频增益。作为下变频的接收机电路为了得到更小的噪声系数, 无源混频器在前级一般要加 LNA, 由此会引起更多的互调失真。无源混频器的变压器通常会限制混频器的最高工作频率, 从而影响带宽, 且集成度差, 体积较大。

##### 2.1 单二极管混频电路

单二极管混频电路如图 2.8.1(a)所示。当  $u_L = U_{Lm}\cos\omega_L t$ ,  $u_L$  足够大时, 二极管工作在大信号开关状态。其开关特性如图 2.8.2 所示。从严格意义上而言, 二极管的跨导是随着被加在它上的大信号的时间规律变化的。为了简化分析, 可以用折现认为跨导为一个常数。图 2.8.1(b)是二极管用大信号模型代替后的等效电路,  $R_D$  为二极管的导通电阻。

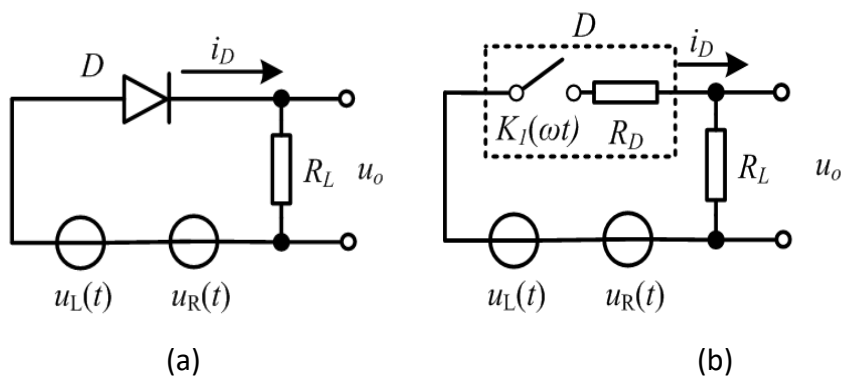


图 2.8.1 单二极管构成的混频电路

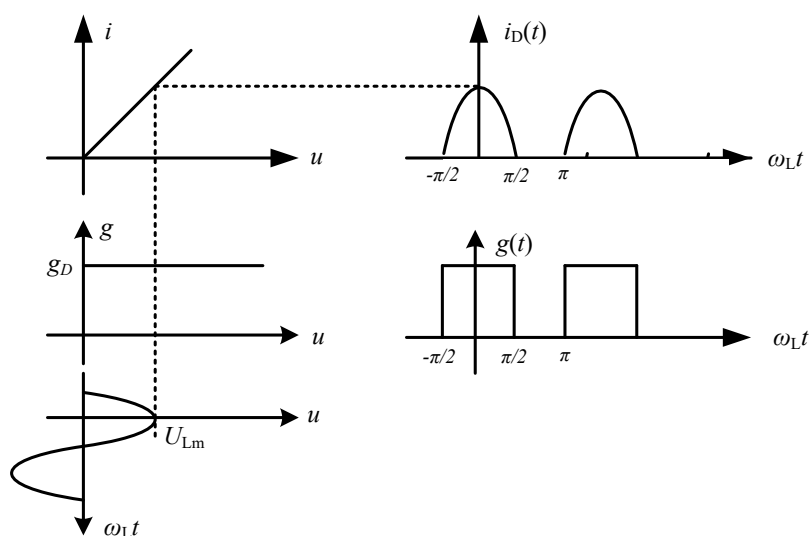


图 2.8.2 大信号时二极管的开关特性

流经二极管的电流  $i_D$  为

$$i_D = \frac{U_{Rm} \cos(\omega_R t)}{R_D + R_L} K_1(\omega_L t) = \frac{U_{Rm}}{R_D + R_L} \cos(\omega_R t) \cdot \left[ \frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \cos \omega_L t - \frac{2}{3\pi} \cos 3\omega_L t + \dots \right]$$

(3-8-1)

其中，第一项为射频信号的直通信号，第二项  $\cos(\omega_R t) \cos(\omega_L t)$  为射频信号与本振信号基波分量的乘积，由此乘积产生  $|\omega_R \pm \omega_L|$  频率分量，这是所需的混频结果；第三项及其高次项为射频信号与本振信号的奇次谐波分量乘积，产生  $|\pm p\omega_L \pm \omega_R|$  频率分量，这已基本接近线性时变工作混频器。

单二极管混频电路的优点是电路简单。缺点为：

- 1) 如果在射频输入信号含有直流分量，本振信号直接馈通到输出端；
- 2) 输出频谱十分丰富，不能提供任何隔离，也不能提供混频增益。除了产生所需的混频结果外，还含有大量的组合频率分量。

## 2.2 二极管平衡混频电路

由两个二极管可以构成一个单平衡混频器，如图 2.8.3 所示。

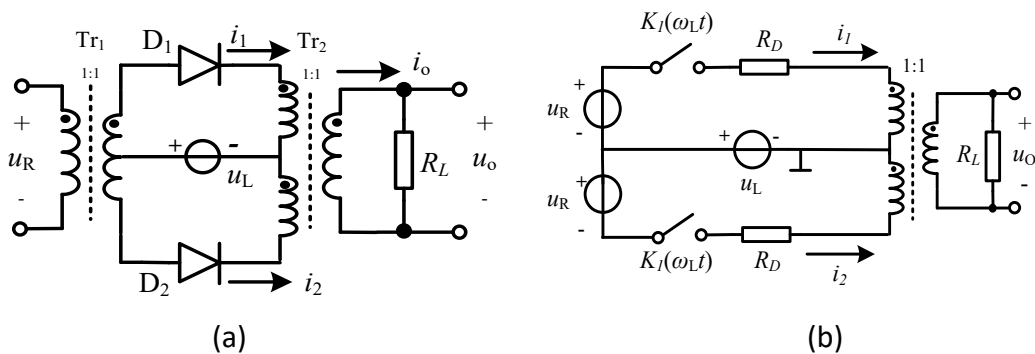


图 2.8.3 单平衡二极管混频电路图

当  $u_L$  在正半周期时，两个二极管全部导通，输入的  $u_R$  射频电压就通过变压器耦合到负载输出端。

当  $u_L$  为负半个周期时，两个二极管全部截止，使得射频信号断开。

以图 2.8.3 为例，设本振电压足够大，即  $U_{Lm} \gg U_{Rm}$ ，求二极管平衡混频器输出的中频电压  $u_o$  表达式，分析过程如下：

可以根据二极管的特性画出该混频器的等效电路图，如图 2.8.3(b)所示。根据基尔霍夫定理，可以列出两个回路的电压关系：

$$u_L = i_1(R_D + R_L) - u_R = u_R + i_2(R_D + R_L)$$

$$\text{由此可得： } i_o = i_1 - i_2 = (2u_R / (R_D + R_L))K_1(\omega_L t)$$

将  $u_R = U_{Rm} \cos \omega_R t$  与  $K_1(\omega_L t)$  的表达式带入二极管电流的表达式可得：

$$u_o = i_o R_L = \frac{2R_L U_{Rm}}{R_D + R_L} \cos \omega_R t \left[ \frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \cos \omega_L t - \frac{2}{3\pi} \cos 3\omega_L t + \dots \right] \quad (3-8-2)$$

这种二极管平衡混频器的输出频谱也为  $|\pm p\omega_L \pm \omega_R|$ 。由于开关函数是  $K_1(\omega_L t)$ ，因此输出频谱与单二极管混频器相同频谱质量也较差。

### 2.3 二极管环形混频电路

为了进一步抑制混频器的非线性产物，广泛采用了双平衡类型的二极管环形混频电路，如图 2.8.4 所示。

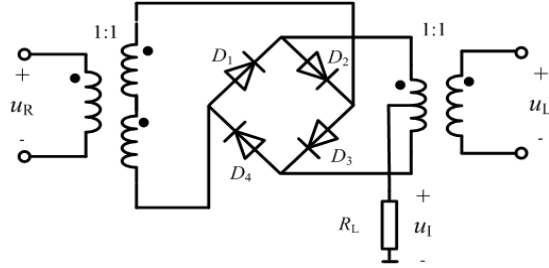


图 2.8.4 双平衡二极管环形混频电路

以图 2.8.4 所示电路为例，设本振电压足够大，即  $U_{Lm} \gg U_{Rm}$ ，输出电压  $u_o(t)$  表达式，分析过程如如图 2.8.5 所示：

二极管  $D1-D4$  处于开关工作状态，其中射频信号  $u_R$  是小信号。

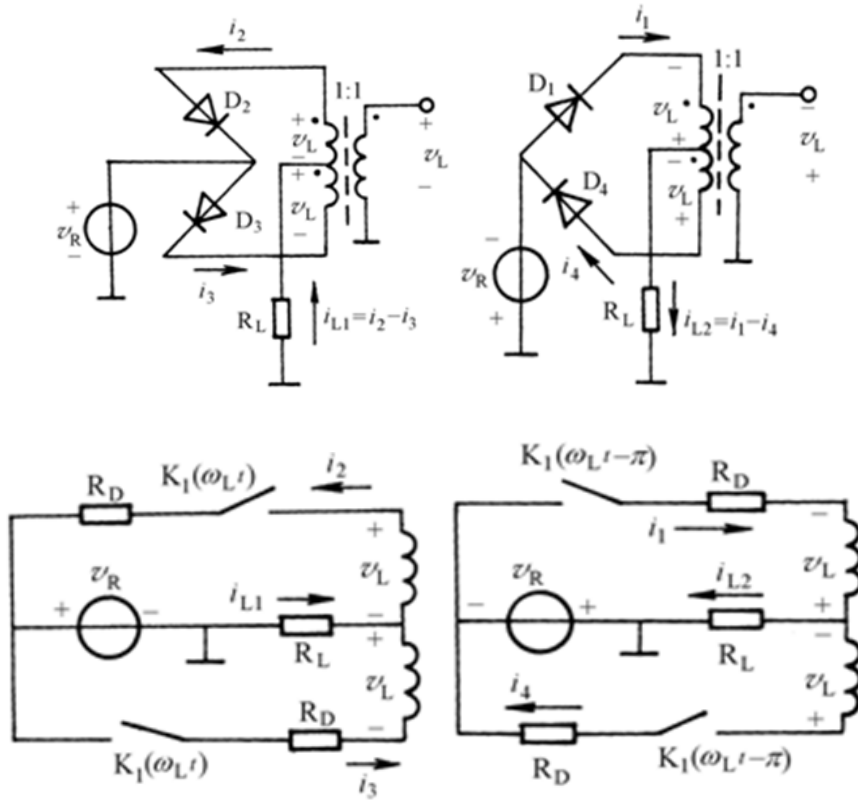


图 2.8.5 双平衡二极管环形混频电路工作状态

当本振信号处于正半周期时，经变压器耦合使得二极管  $D2$  与  $D3$  导通。根据基尔霍夫定理，该回路的方程为

$$u_L = i_2 R_D + u_R + (i_2 - i_3) R_L$$

$$u_L = i_3 R_D - u_R + (i_3 - i_2) R_L$$

当本振信号处于负半周期时，经变压器耦合使得二极管  $D1$  与  $D4$  导通。根据基尔霍夫定理，该回路的方程为

$$u_L = i_4 R_D - u_R + (i_4 - i_1) R_L$$

$$u_L = (i_1 - i_4) R_L + u_R + i_1 R_D$$

将两个回路的方程联列消去  $u_L$  并考虑开关函数  $K_I(\omega_L t)$  可得：

$$i_{L1} = i_2 - i_3 = -2U_R / (R_D + 2R_L) K_1(\omega_L t)$$

$$i_{L2} = i_1 - i_4 = -2U_R / (R_D + 2R_L) K_1(\omega_L t - \pi)$$

则流过  $R_L$  的总电流为：

$$i_L = i_{L1} - i_{L2} = \frac{2U_{Rm} \cos \omega_R t}{R_D + 2R_L} \cdot \frac{4}{\pi} \left[ \cos \omega_L t - \frac{1}{3} \cos 3\omega_L t + \dots \right] \quad (3-8-3)$$

由式 (3-8-3) 可知，流过负载  $R_L$  的电流信号  $i_L$  中包含有  $|\pm p\omega_L \pm \omega_R|$  频率分量，其中  $p=1,3,5,\dots$  为奇数正整数，显然当  $p=1$  是，输出频率分量为  $|\pm \omega_L \pm \omega_R|$ ，这就是混频相乘输出的中频分量。同时，也可以看出混频输出中已抵消了射频输出分量，频谱质量较好。

### 三、实验内容

#### (一) 二极管环形混频电路

##### 1、电路结构

一个二极管环形混频电路如图 2.8.6 所示。根据电路原理图，选取相应的器件，构成实验电路。

在变压器  $T_1$  处加入射频信号  $U_R$ ，在  $T_2$  处加入本振信号  $U_L$ 。

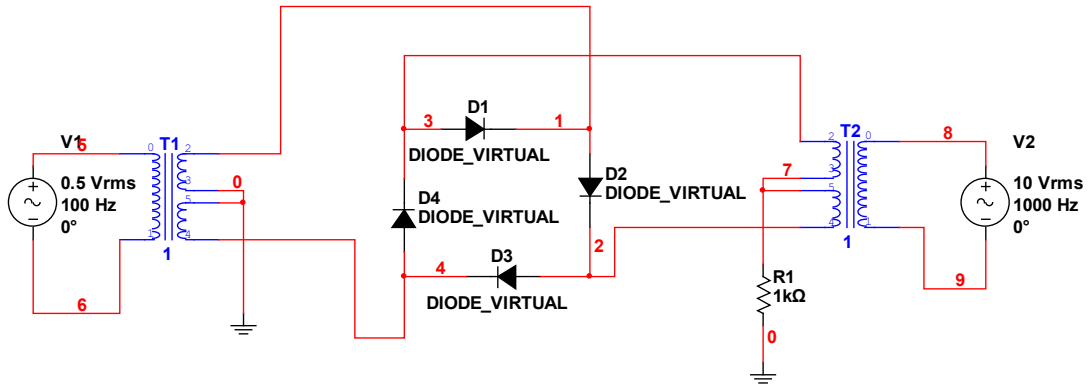


图 2.8.6 二极管环形混频实验电路

如图 2.8.7 所示，电路中二极管的类型选择为 DIODE\_VIRTUAL 型。

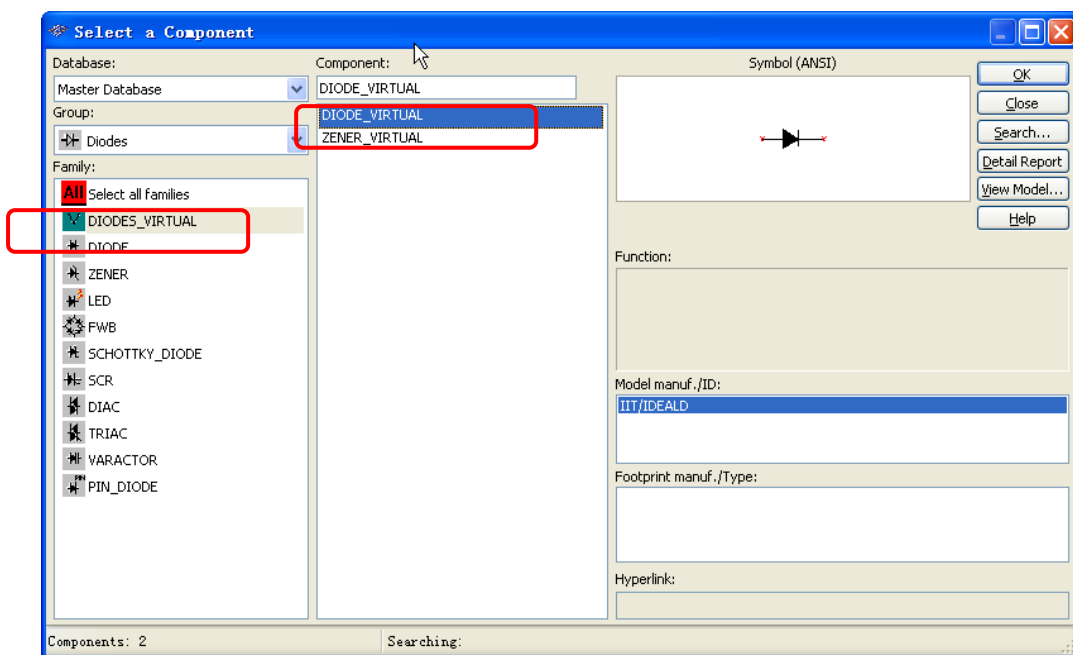


图 2.8.7 二极管元件库

如图 2.8.8 所示，电路中变压器的类型选择为 TS\_XFMR2 型。

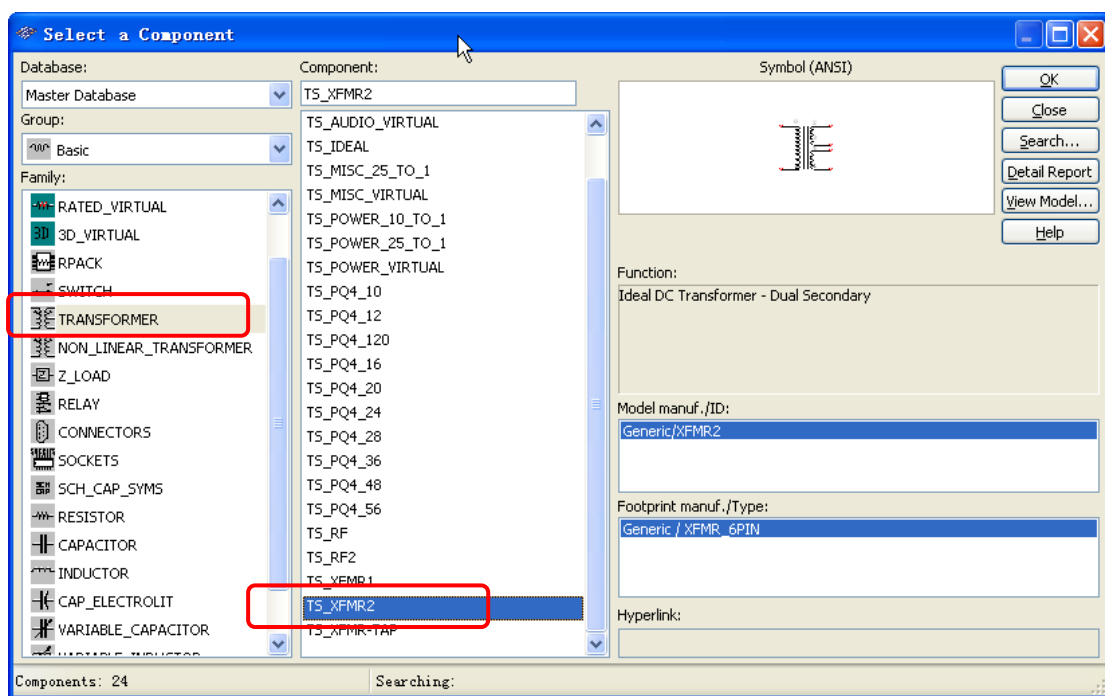


图 2.8.8 变压器元件库

如图 2.8.9 所示，选择“AC Power”类信号作为  $U_L$  输入信号和  $U_R$  输入信号。其中的  $U_L$  输入信号的 Voltage(RMS)值设为 10V，Frequency 设为 1kHz； $U_R$  输入信号的 Voltage(RMS)值设为 0.5V，Frequency 设为 100Hz

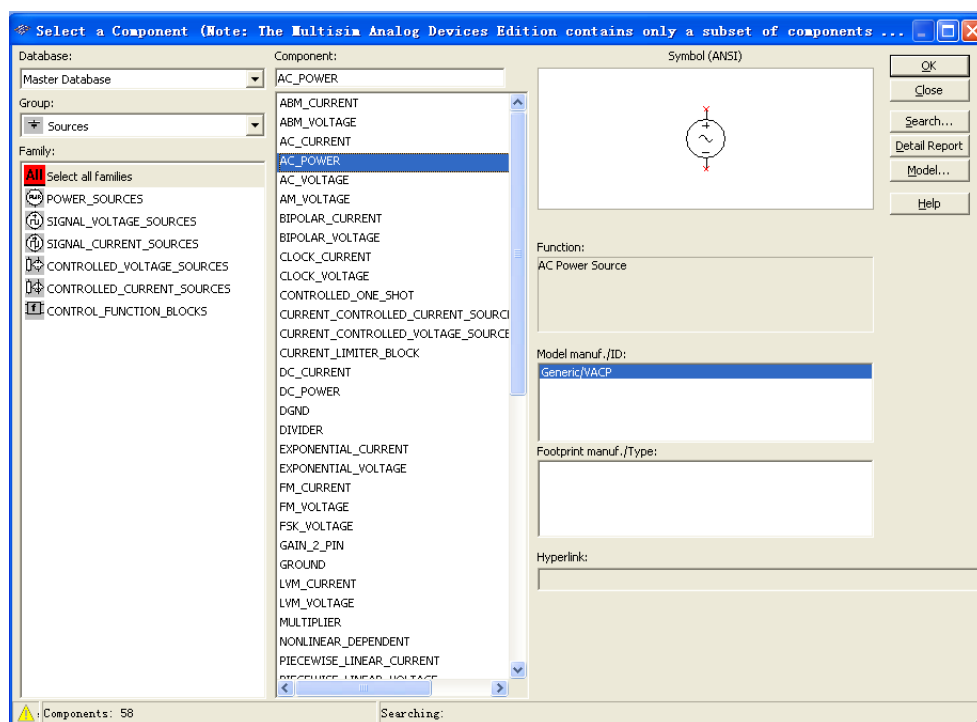


图 2.8.9 信号源库

## 2、傅里叶分析

单击主菜单下 Simulate→Analysis→Fourier analysis 选项，弹出 AC Analysis 对话框，进入傅里叶分析状态。如图 2.8.10 所示。

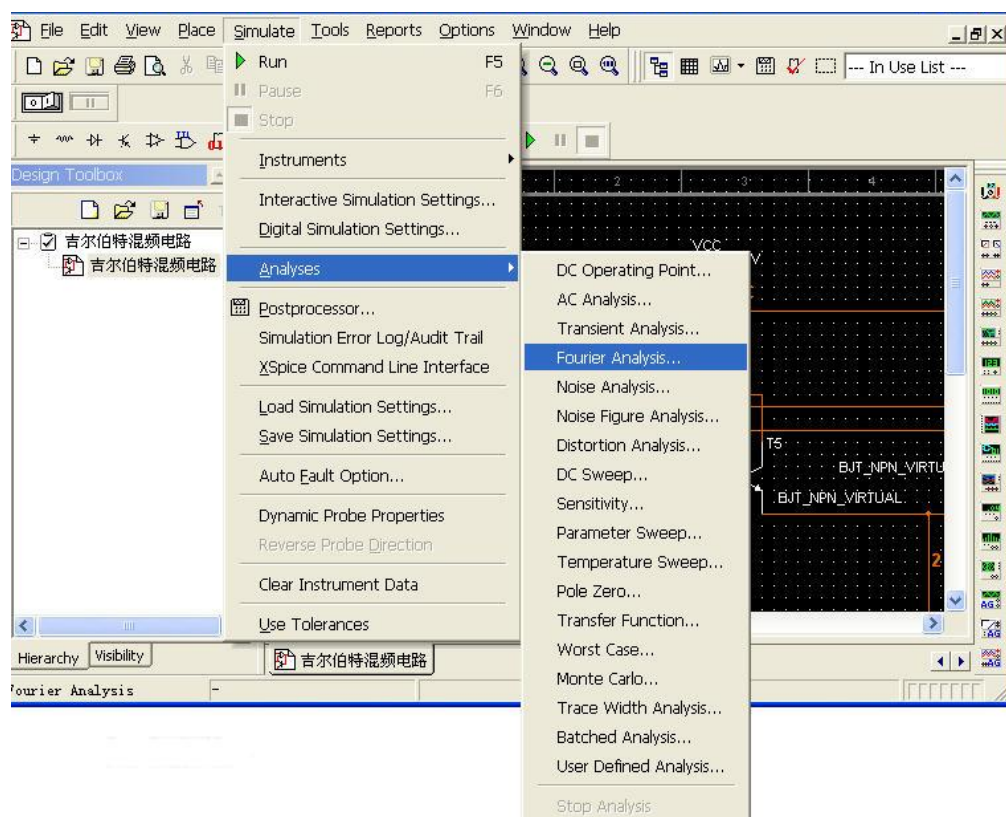


图 2.8.10 Analysis 菜单

Fourier Analysis 对话框有 Analysis Parameters 、 Output 、 Analysis Options

和 Summary 共四个选项卡。在 Frequency Parameters 选项卡中将采样频率 frequency resolution 设置为 100Hz（通过点击“Estimate”，由程序自动设置），采样包络数 Number of Harmonics 设置为 40，如图 2.8.11 所示。在 Frequency Parameters 选项卡中，将图 2.8.6 中  $R_1$  的电压（对应于图 2.8.6 中节点 7）设为所需分析的变量。取样停止时间一栏点击“Estimate”，由程序自动设置，如图 2.8.12 所示。设置完毕点击“OK”，点击“Simulate”，获取傅里叶分析的参数结果与相应变量的频谱图，并对其进行分析。

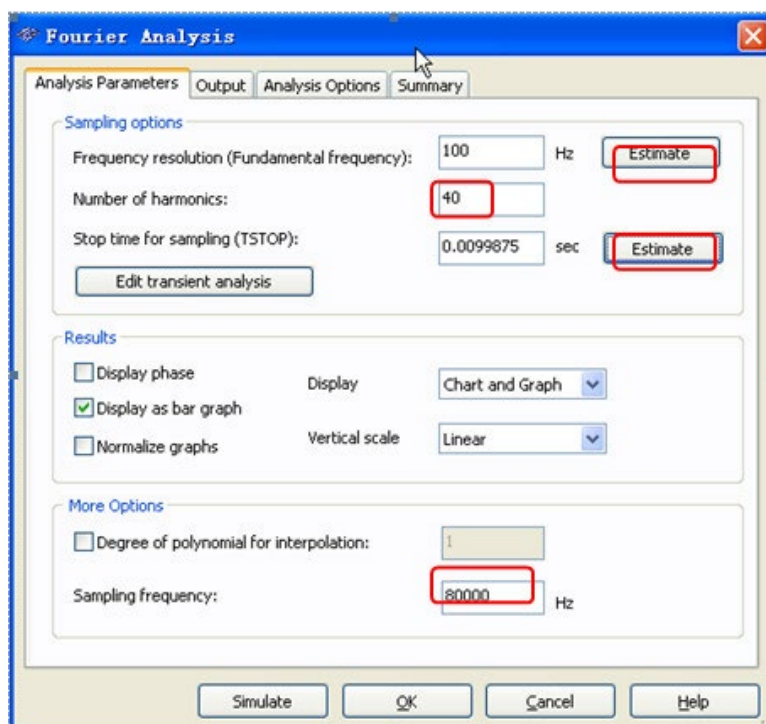


图 2.8.11 Analysis Parameters 选项卡

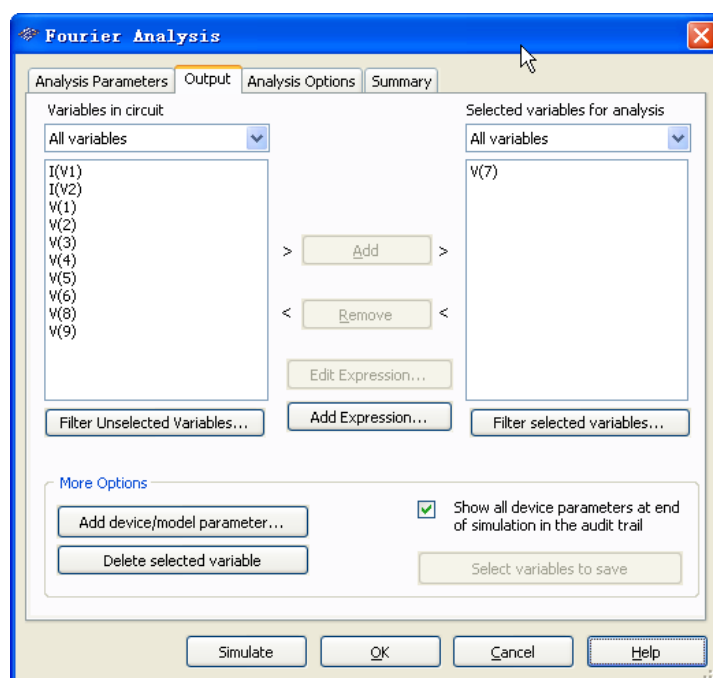


图 2.8.12 Output 选项卡



#### 四、预习要求

熟悉无源混频器的基本数学模型与常见的实现结构,理解各种无源混频器的电路工作原理。

#### 五、实验报告要求

- (1) 记录仿真获取的实验数据与频谱曲线。
- (2) 对加入滤波器前后所获得仿真结果进行比较,并分析原因。