

## 2.9 有源混频器实验（虚拟实验）

### 一、实验目的

- （1）进一步理解混频器的工作原理；
- （2）掌握有源混频器的工程设计方法；
- （3）掌握混频器基本参数的测量方法；
- （4）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

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： $A\cos\alpha \cdot B\cos\beta = AB[\cos(\alpha+\beta) + \cos(\alpha-\beta)]$ ，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

$$f_i = f_L + f_R \quad (2.9.1)$$

在接收机电路中通常取下混频信号，即

$$f_i = |f_R - f_L| \quad (2.9.2)$$

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。

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。

有源混频器可以提供混频增益，通常采用有源平衡—非平衡转换电路，易于集成。有源混频器在射频集成电路（RFIC）中的应用更为广泛。在有源混频器中，通常把射频电压转成电流信号，本振开关控制电流信号。有源混频器的主要优点有通过端接适当负载获得一定的电压增益、对本振的振幅要求降低、端口的隔离度更好、更适于低电压工作等。其缺点为需要一定的偏置电流，带来了直流功耗和射频电压的直流分量，线性度也受到了限制。

### 三、实验内容

#### 1、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 2.9.1 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 T1 处加入射频信号  $U_R$ ，在 T2 处加入本振信号  $U_L$ 。

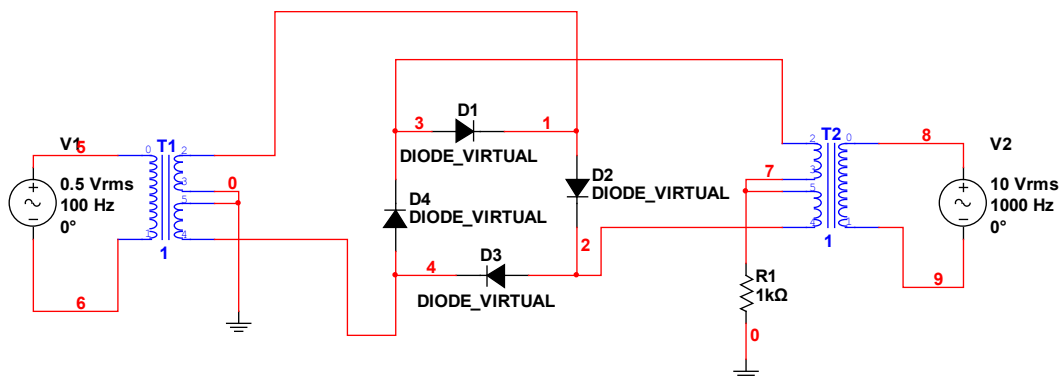


图 2.9.1 二极管环形混频器实验电路

如图 2.9.2 所示，电路中二极管的类型选择为 DIODE\_VIRTUAL 型。

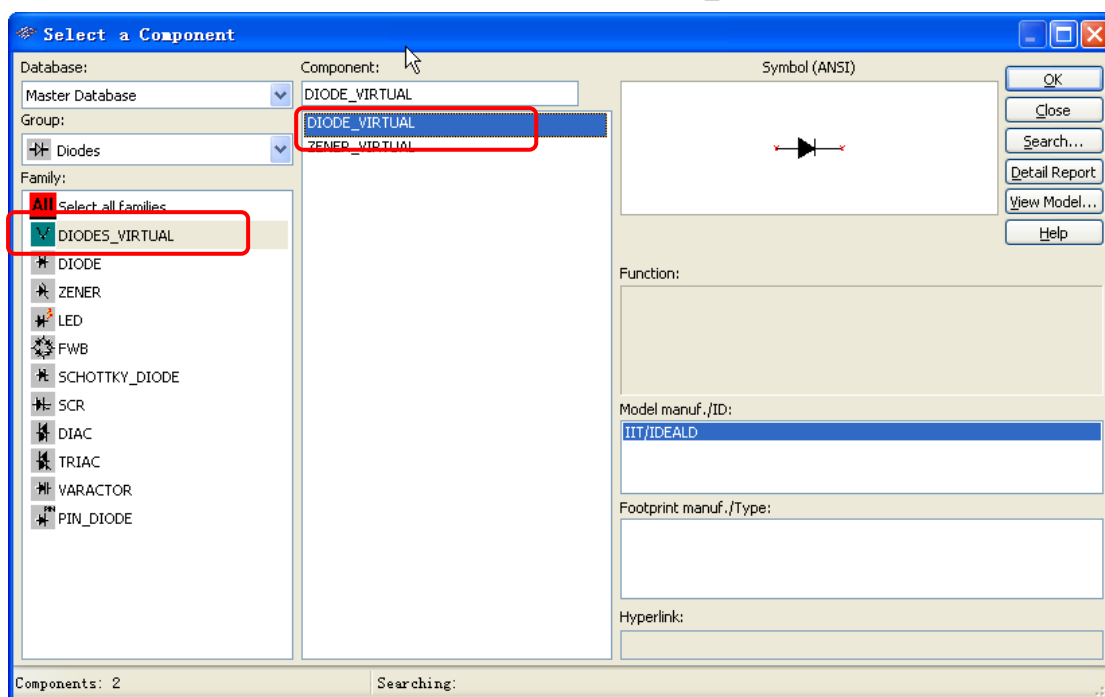


图 2.9.2 二极管元件库

如图 2.9.3 所示，电路中变压器的类型选择为 TS\_XFMR2 型。

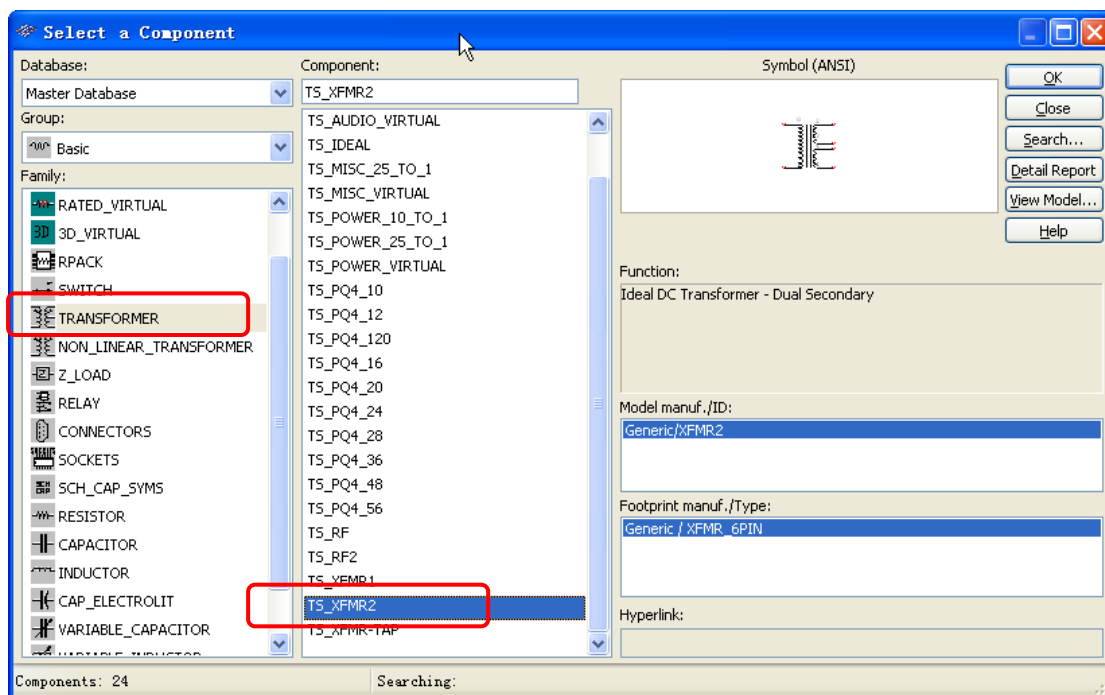


图 2.9.3 变压器元件库

如图 2.9.4 所示，选择“AC Power”类信号作为 UL 输入信号和 UR 输入信号。其中的 UL 输入信号的 Voltage(RMS)值设为 10V, Frequency 设为 1kHz; UR 输入信号的 Voltage(RMS)值设为 0.5V, Frequency 设为 100Hz

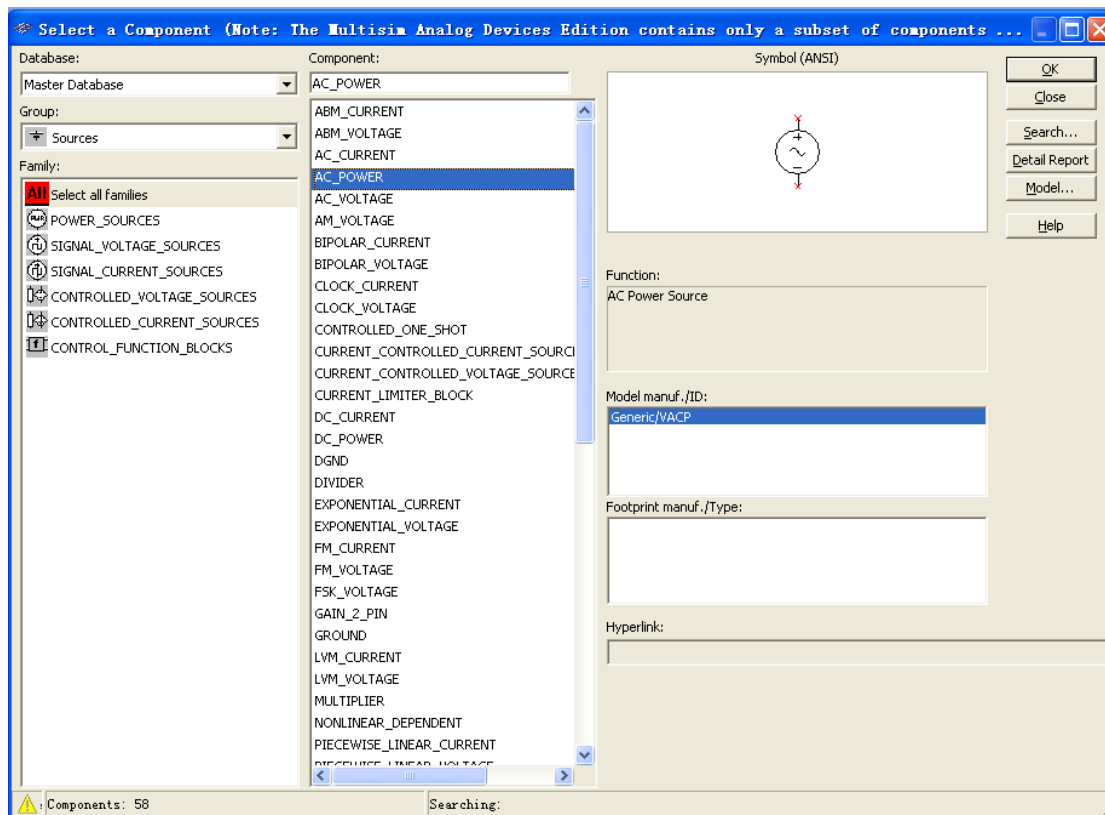


图 2.9.4 信号源库

## (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 2.9.5 所示。

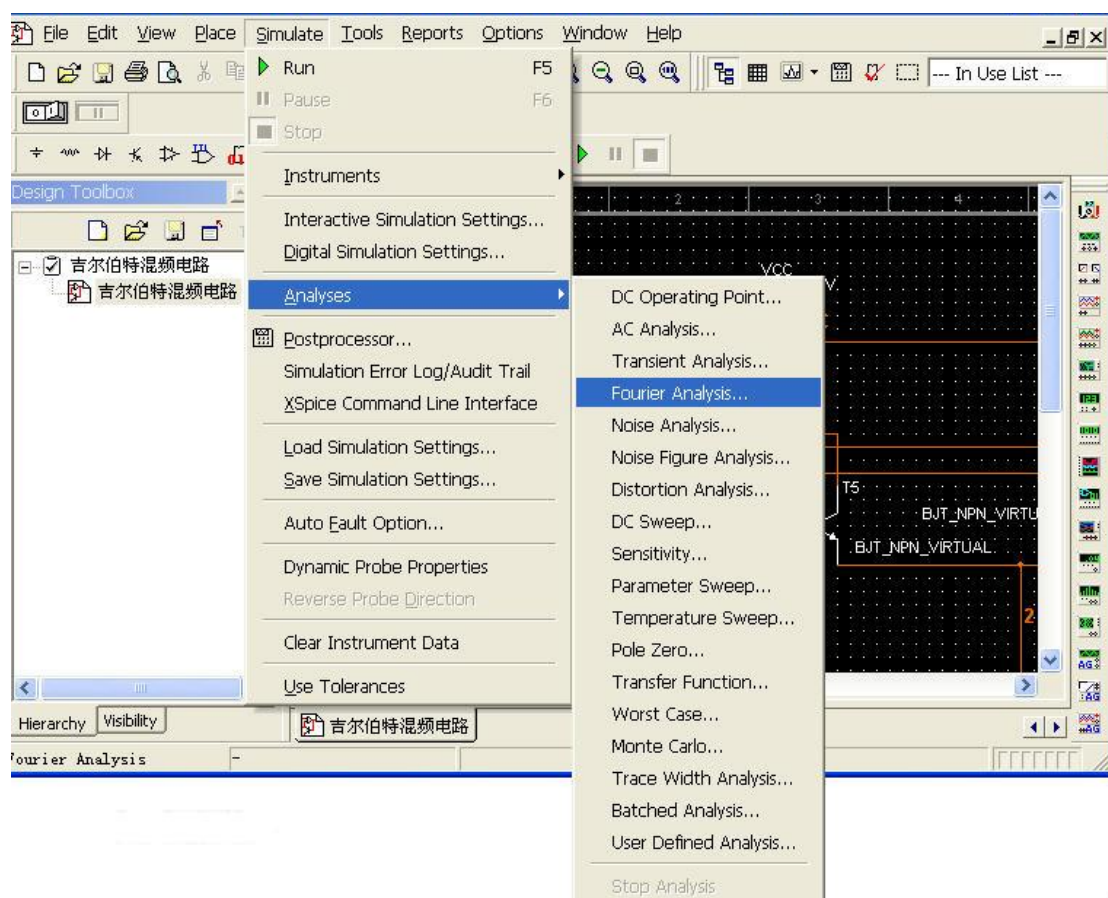


图 2.9.5 Analysis 菜单

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 2.9.6 所示。在 Frequency Parameters 选项卡中，将图 2.9.1 中 R1 的电压（对应于图 2.9.1 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 2.9.7 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。

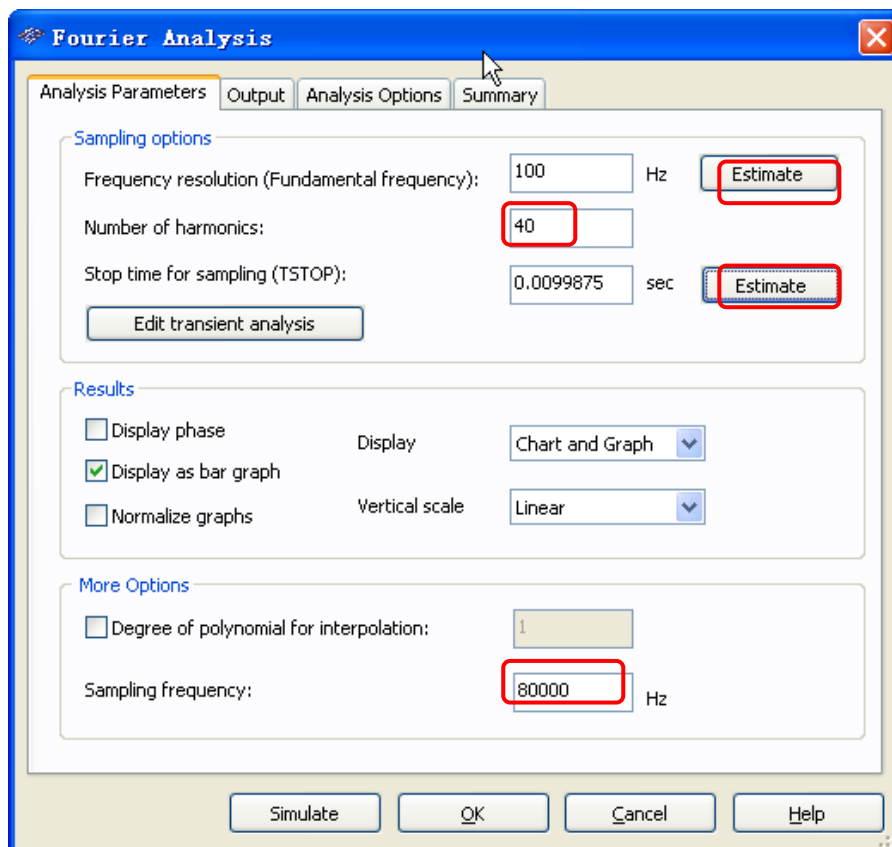


图 2.9.6 Analysis Parameters 选项卡

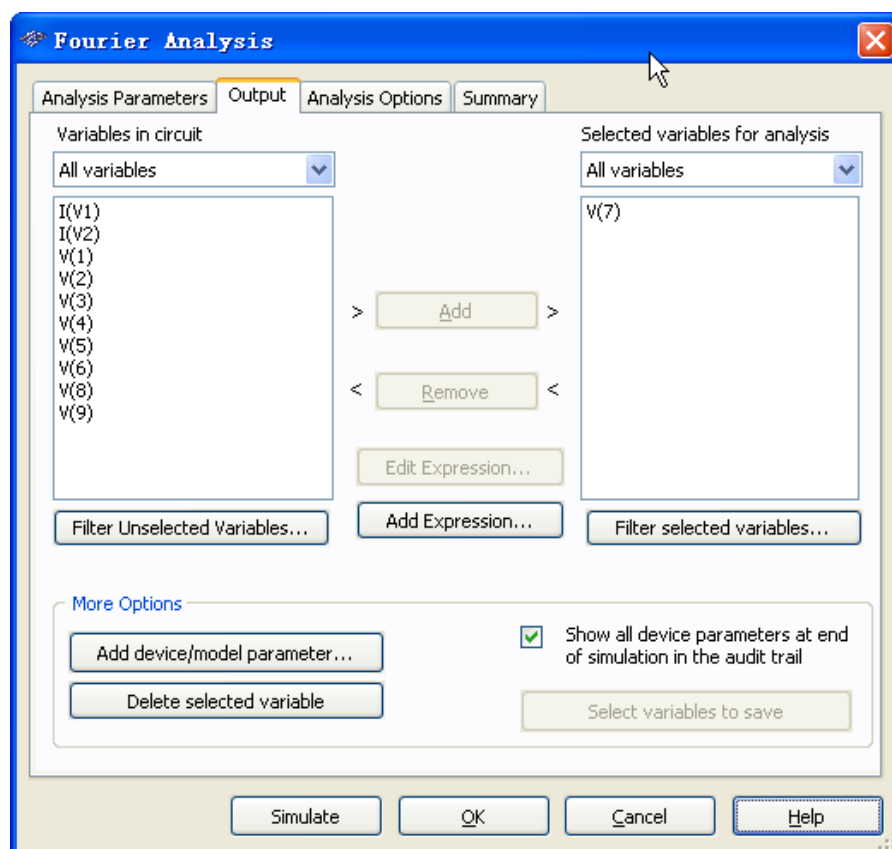


图 2.9.7 Output 选项卡

## 2、三极管单平衡混频电路

### (1) 电路结构

一个三极管单平衡混频电路如图 2.9.8 所示。根据电路原理图，选取相应的器件，构成实验电路。在晶体管 Q1 与 Q2 的基极间加入本振信号 UL，在晶体管 Q3 的基极的加入射频信号 UR。Q3 为共射极小信号放大器，增益为  $g_m$ ，其通断受到本振信号 UL 的控制。若本振信号的电压幅度足够大，使得 Q1 与 Q2 在本振信号的作用下交替地把射频电流信号从负载电阻 RL 的一边切换到另一边，在两个负载电阻上输出同相的中频电压 UIF。

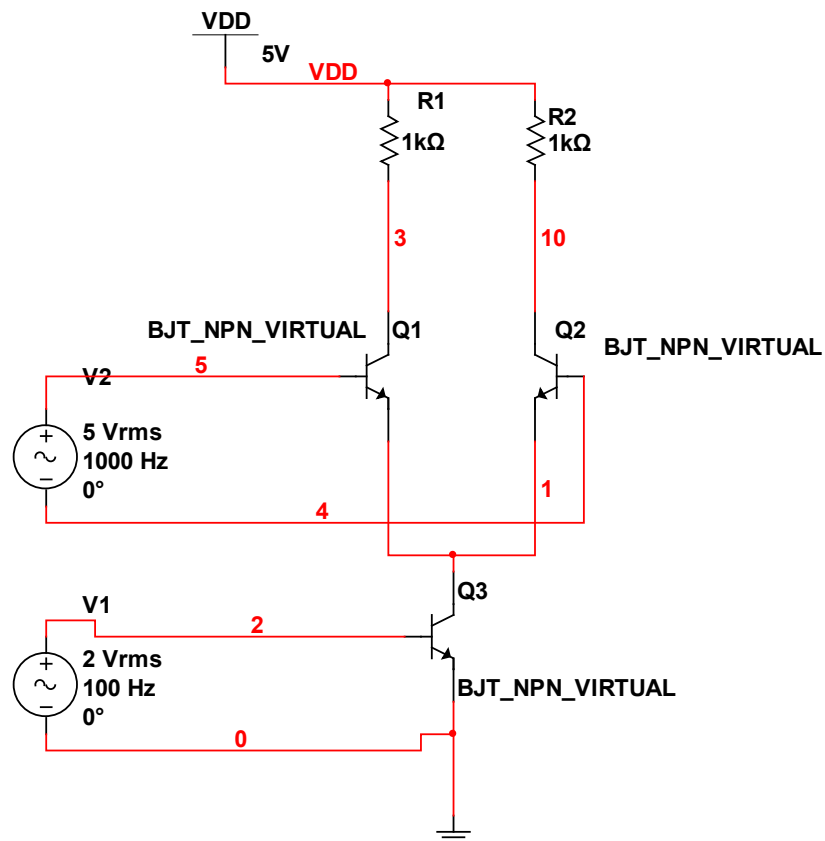


图 2.9.8 三极管单平衡混频实验电路

如图 2.9.9 所示，电路中晶体管的类型选择为 BJT\_NPN\_VIRTUAL 型。

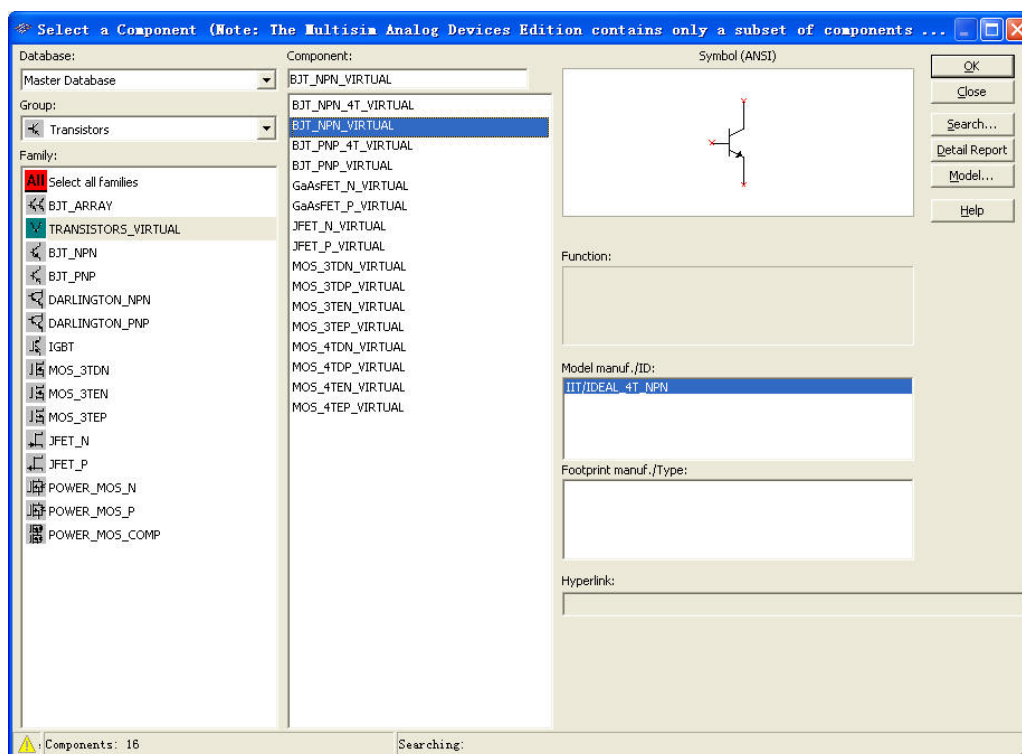


图 2.9.9 晶体管元件库

如图 2.9.10 所示，选择“AC Power”类信号作为 UL 输入信号，置于晶体管 Q1 与 Q2 的基极之间。选择“AC Power”UR 输入信号，置于晶体管 Q3 的基极与发射极之间。其中的 UL 输入信号的 Voltage(RMS)值设为 5V，Frequency 设为 1kHz；UR 输入信号的 Voltage(RMS)值设为 2V，Frequency 设为 100Hz

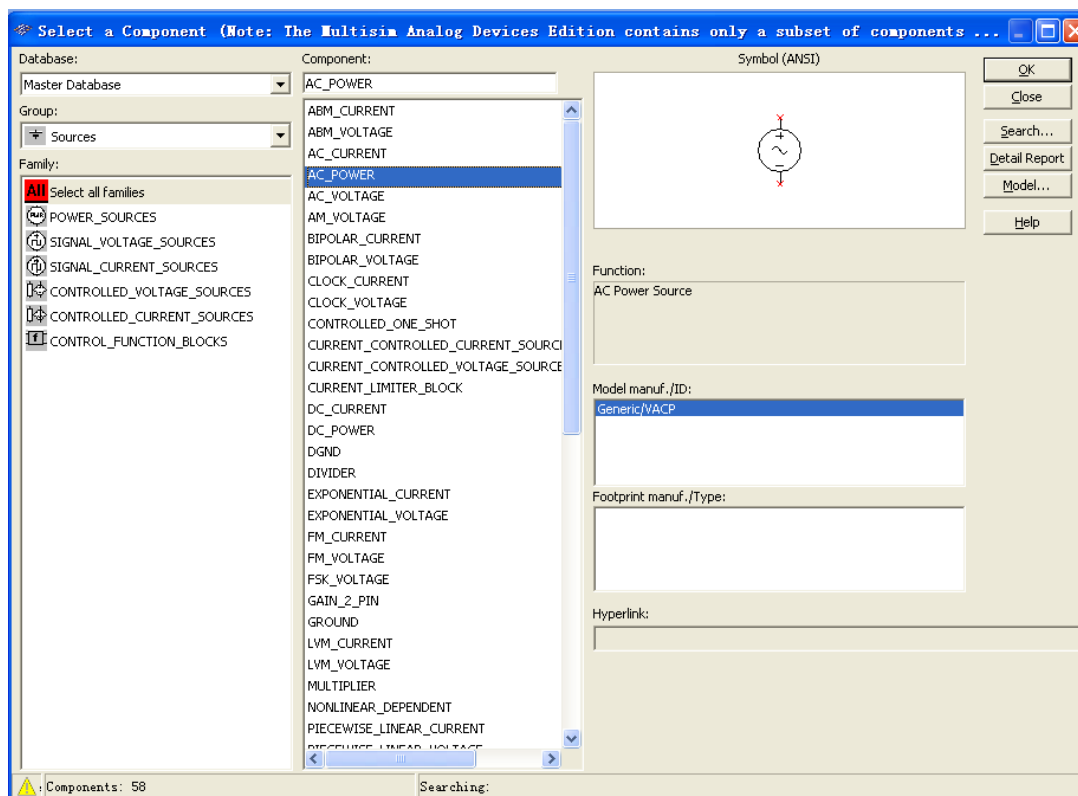


图 2.9.10 信号源库

## (2) 直流分析

对电路进行直流分析，观察各节点的直流电压。在输出波形不失真的情况下，单击主菜单下 Options→Sheet Properties→Show All 选项，使电路图中显示所有节点编号。然后单击 Simulate→Analysis→Dcoperating Point，在 output 选项里在 Variables in circuit 选择需要仿真的变量，单击 ADD，添加到 Selected variables for analysis 然后单击 Simulate，获得仿真结果。

## (3) 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 2.9.11 所示。

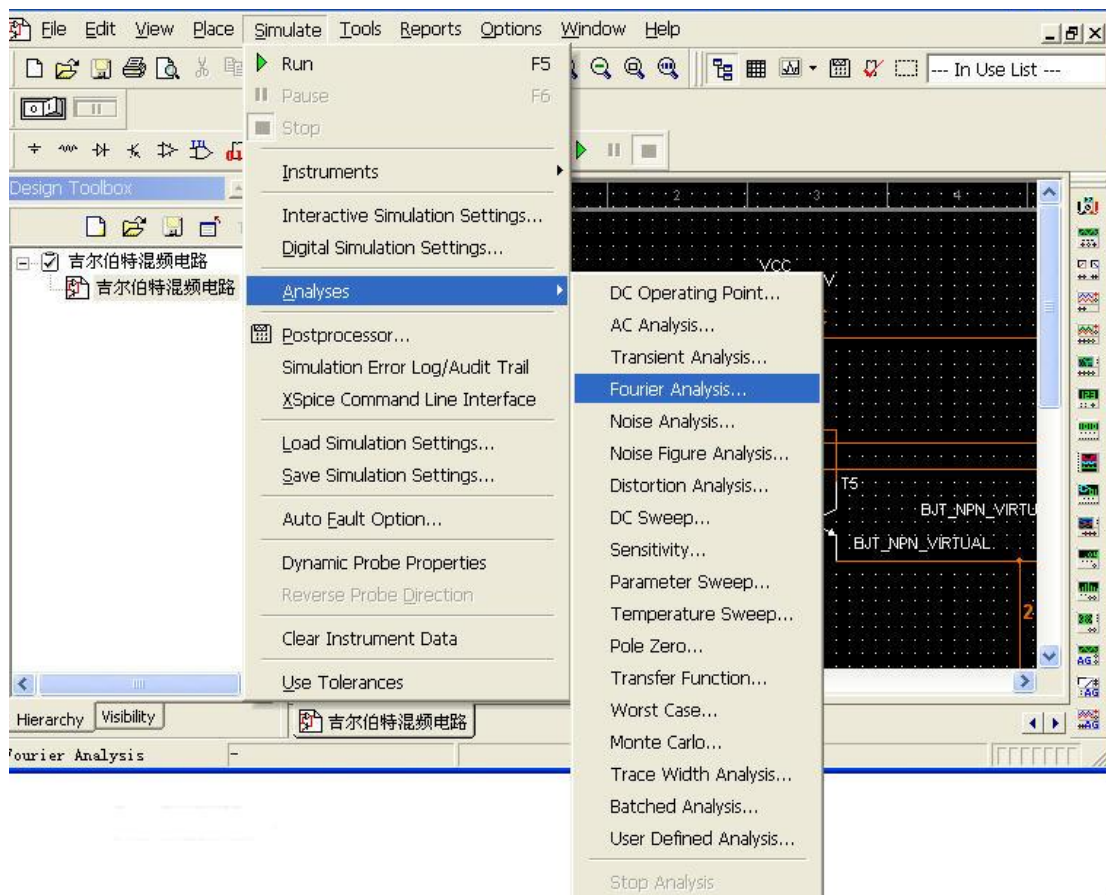


图 2.9.11 Analysis 菜单

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（单击“Estimate”直接默认），采样包络数 Number of Harmonics 设置为 40，停止时间也由单击“Estimate”直接默认，如图 2.9.12 所示。在 Frequency Parameters 选项卡中，分别将图 2.9.8 中 UIF 两个输出节点中的一个节点的输出电压，以及该两个节点输出电压的差值设为所需分析的变量，如图 2.9.13 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。（其中，两个节点输出电压的差值的表达式通过点击“Add Expression”，如图 2.9.14）



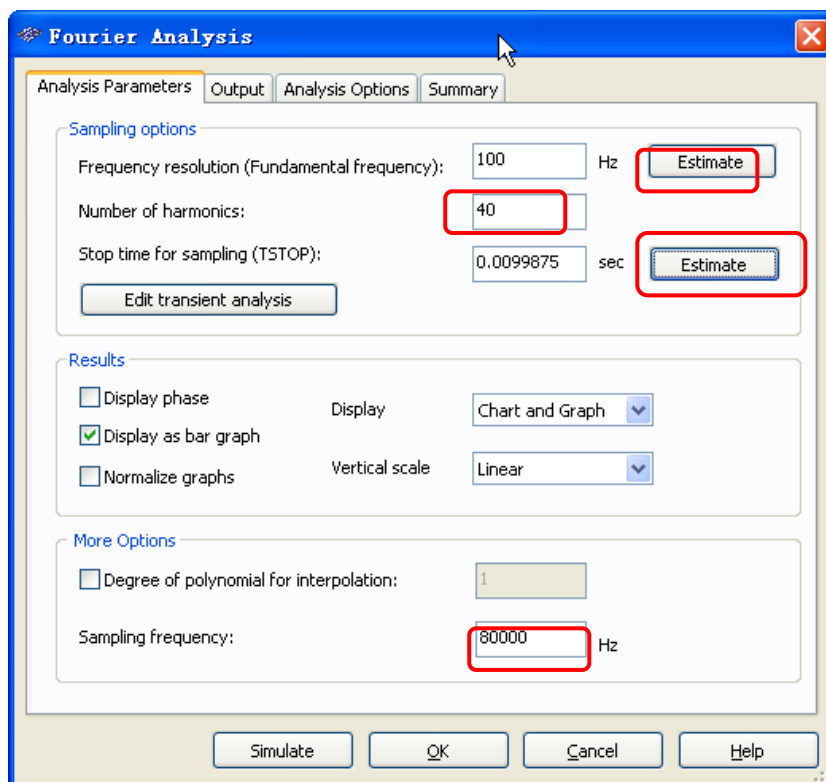


图 2.9.12 Analysis Parameters 选项卡

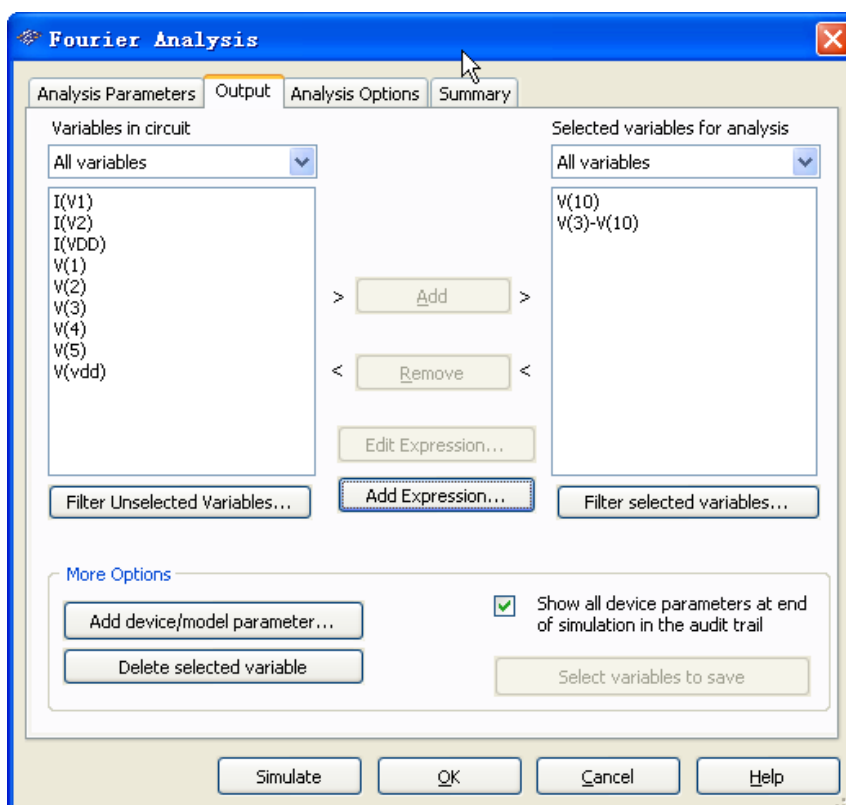


图 2.9.13 Output 选项卡

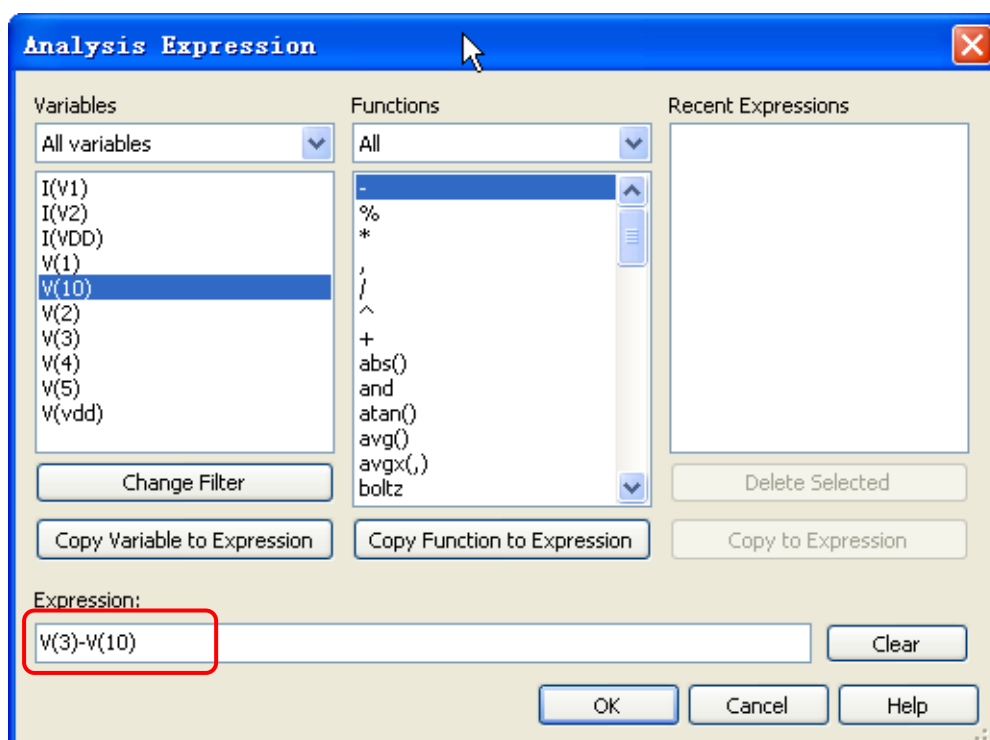


图 2.9.14 设定两个节点输出电压的差值表达式

如图 2.9.15 所示，将虚线框中的有源滤波器加入电路。其中滤波器运算放大器的类型选择为 OPAMP\_3T\_VIRTUAL 型，如图 2.9.16 所示。

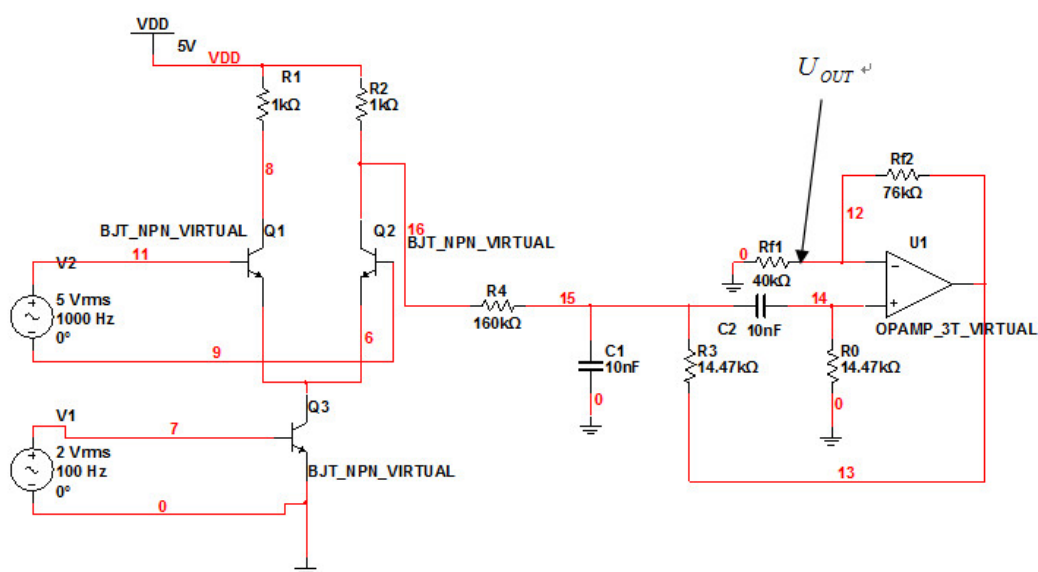


图 2.9.15 具有有源滤波器的三极管单平衡混频实验电路

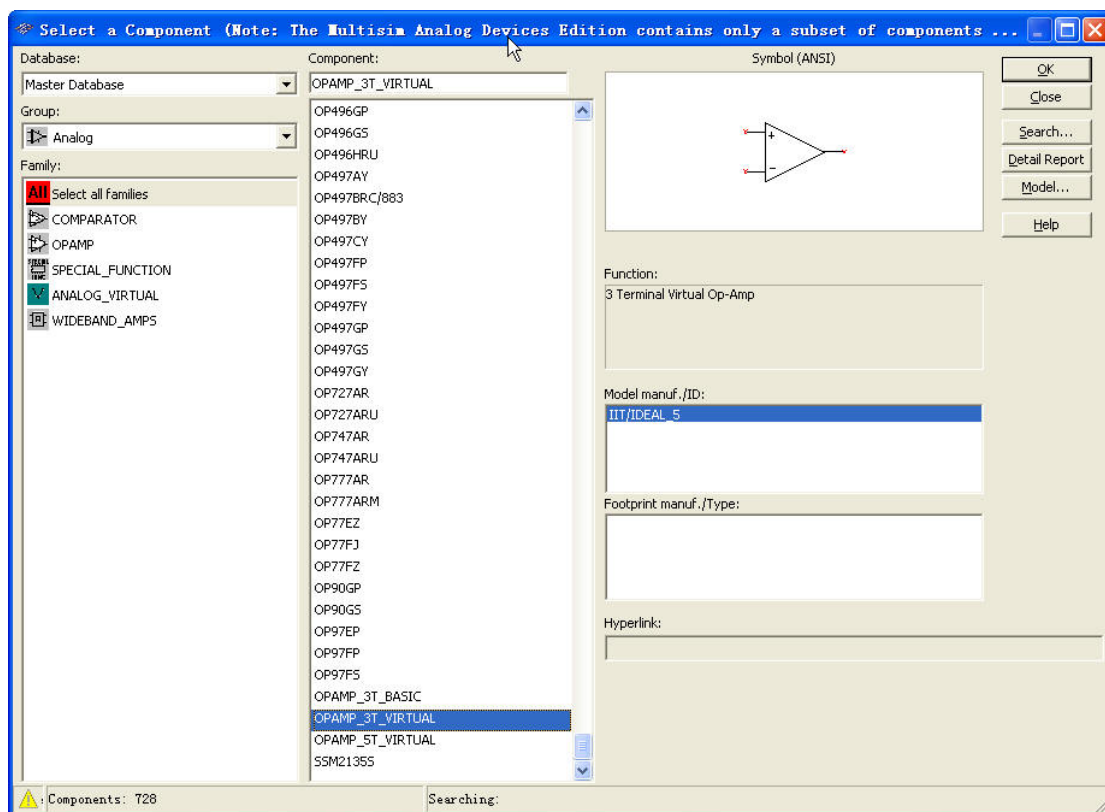


图 2.9.16 运算放大器元件库

在加入了有源滤波器后，再对电路进行傅里叶分析，获取 UIF（Q1 与 Q2 集电极电压相减）、Uout 节点的傅里叶分析的参数结果与相应变量的频谱图。

### 3、吉尔伯特单元混频电路

采用对三极管单平衡混频电路的分析方法，吉尔伯特单元混频电路进行各项电路性能分析。

#### （1）电路结构

一个三极管单平衡混频电路如图 2.9.17 所示。根据电路原理图，选取相应的器件，构成实验电路。在晶体管 T3 与 T4 的基极间加入本振信号 UL，晶体管 T1 与 T2 的基极间的加入射频信号 UR。T1 与 T2 为差分小信号放大器，受到本振信号 UL 的控制。电路中 T3-T6 构成的倒相开关使得差分中频输出电压抵消掉了由于射频直流分量的存在而产生的本振输出分量。差分输出的电压幅度比单平衡混频器增加一倍。

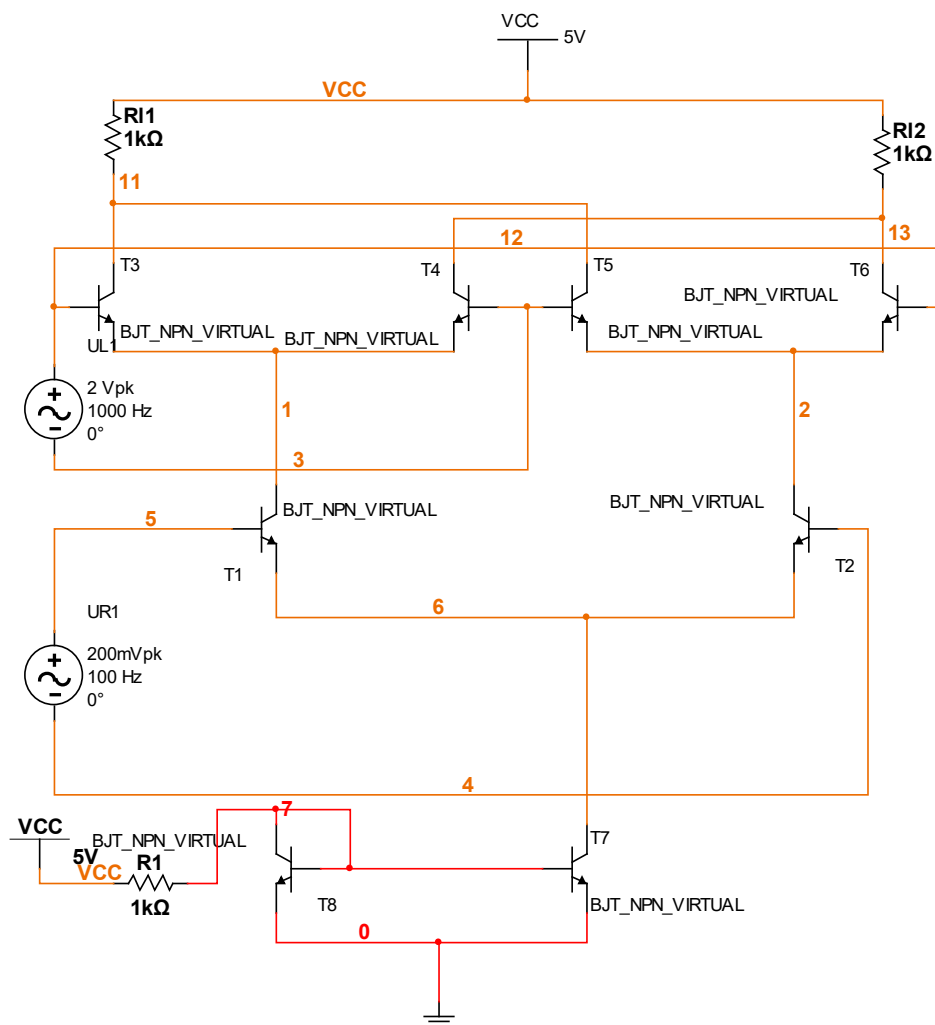


图 2.9.17 吉尔伯特单元混频实验电路

选择“AC Power”作为 UL 与 UR 输入信号。UL 输入信号的 Voltage(RMS)值设为 2V，Frequency 设为 1kHz；UR 输入信号的 Voltage(RMS)值设为 0.2V，Frequency 设为 100Hz。

### (2) 直流分析

对电路进行直流分析，观察各节点的直流电压。在输出波形不失真的情况下，使电路图中显示所有节点编号。然后单击 Simulate→Analysis→Dcoperating Point，在 output 选项里在 Variables in circuit 选择需要仿真的变量，单击 ADD，添加到 Selected variables for analysis 然后单击 Simulate，获得仿真结果。

### (3) 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。

将图 2.9.17 中 UIF 两个输出节点(节点 11、13)中的一个节点的输出电压，以及该两个节点输出电压的差值设为所需分析的变量，获取傅里叶分析的参数结果与相应变量的频谱图。

如图 2.9.18 所示，将虚线框中的有源滤波器加入电路。其中滤波器运算放大器的类型选择为 OPAMP\_3T\_VIRTUAL 型。

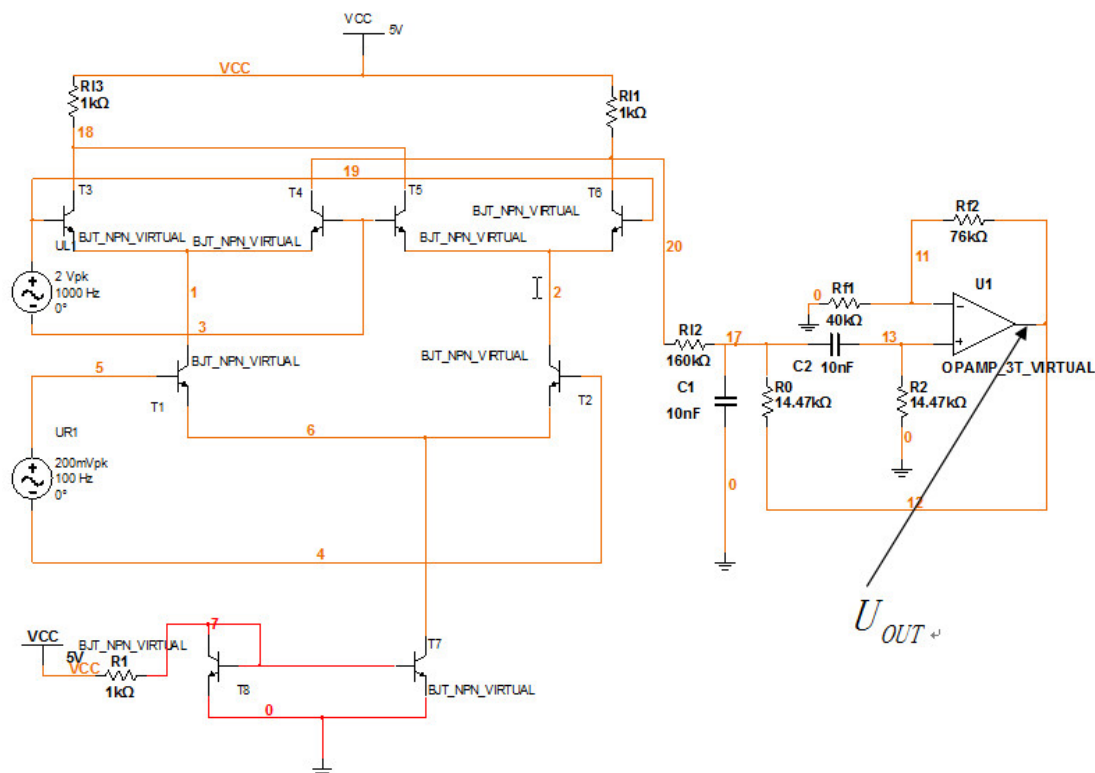


图 2.9.18 具有有源滤波器的吉尔伯特单元混频实验电路

在加入了有源滤波器后，再对电路进行傅里叶分析，获取 UIF、Uout 节点的傅里叶分析的结果参数与相应变量的频谱图。

## 四、预习要求

熟悉混频器的基本数学模型与常见的实现结构，理解有源单平衡混频器与吉尔伯特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。
- (3) 完成思考题

## 六、思考题：

- (1) 比较在输入相同的本振信号与射频信号的情况下，三极管单平衡混频电路与吉尔伯特混频器两种混频器的仿真结果尤其是傅里叶分析结果的差异，分析其中的原因。若将本振信号都设为 1MHz，射频频率设为 200kHz，结果有何变化，分析原因。
- (2) 对图 2.9.18 中加入的有源滤波器的特性进行分析，对其幅频特性、相频特性进行仿真。若要使得滤波器的带宽减小 20%，应对滤波器元件参数如何调整。将调整带宽后的滤波器与混频器相连，比较前后傅里叶分析的结果异同，分析原因。