

第五章 模拟乘法器

- 5.1 概述
- 5.2 变跨导式乘法器
- 5.3 准模拟乘法器

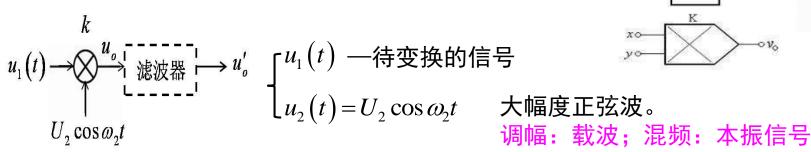
5.1 概述



分类: 模拟乘法器和数字乘法器。

电路符号

模拟乘法器: 非线性电路中用于实现线性频率变换。



- (1) 良好的乘积线性。k 与输入以及外界环境无关;
- (2) 尽可能大的动态范围。
 - a. 在一定的乘法线性要求下,所允许的输入信号 $u_1(t)$ 、 $u_2(t)$ 的最大幅度;
 - b. 输入信号的极性限制。一象限乘法器、二象限乘法器、四象限乘法器。
- (3) 合适的频带宽度(频响)。
 - a. 由非线性器件构成的乘法器本身的上限频率要高于输入信号的最高频率;
 - b. 非线性器件产生新的频率成分 $m\omega_1 \pm n\omega_2$,一般乘法器后面都加有滤波器用于滤除不必要的频率分量。

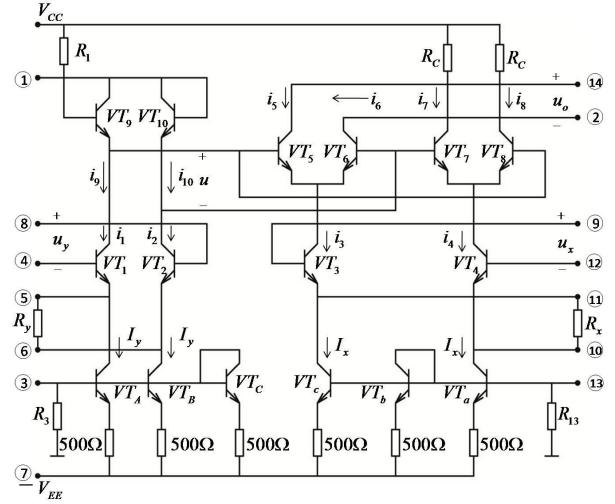
基本要求



一种以差分电路为基本部件的电路,性能良好、价格低廉。图示为单片集成模拟乘法器MC1495/MC1595(国产BG314)的简化电路。Motorola公司10MHz以内应用最多的电路MC1496/MC1596。

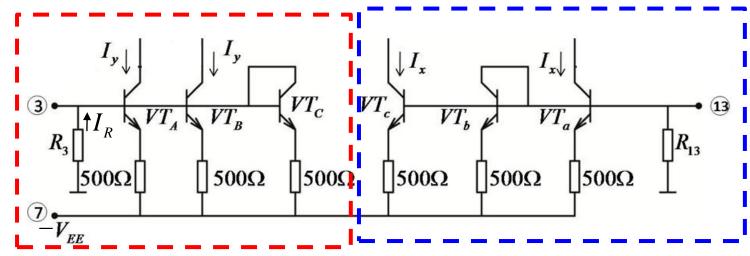
特点:

- (1) 温度特性好;
- (2)四象限工作。对输入信号没有限制,广泛应用于各种线性频率变换电路中。





(1) 偏置电路 (恒流源部分)



两组镜像电流源〈

1、由 VT_A 、 VT_B 、 VT_C 、 R_3 构成,给 VT_1 、 VT_2 组成的差分电路提供偏置 2、由 VT_a 、 VT_b 、 VT_c 、 R_1 构成,给 VT_3 、 VT_4 组成的差分电路提供偏置

$$\begin{cases} I_{B} = I_{y} / \beta \\ I_{R}R_{3} + (I_{y} + I_{y} / \beta)0.5 + U_{BE} - V_{EE} = 0 \\ I_{R} = I_{y} + 3I_{B} = I_{y} + 3I_{y} / \beta \end{cases}$$

$$\Rightarrow I_{y} = \frac{V_{EE} - U_{BE}}{(1 + 3/\beta)R_{3} + (1 + 1/\beta) \times 0.5} \approx \frac{V_{EE} - 0.7}{R_{3} + 0.5}$$

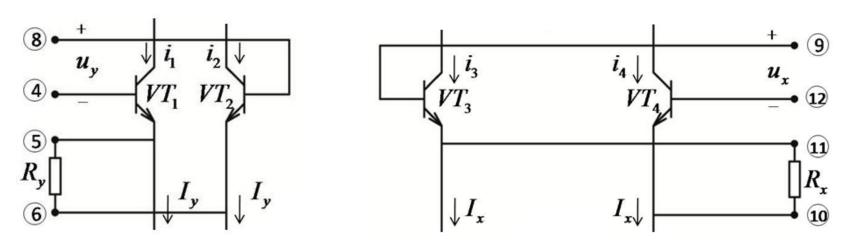
同理:

$$I_x = \frac{V_{EE} - U_{BE}}{(1+3/\beta)R_{13} + (1+1/\beta) \times 0.5} \approx \frac{V_{EE} - 0.7}{R_{13} + 0.5}$$



(2) $u \rightarrow i$ 线性变换电路

由 VT_1 、 VT_2 、 R_v 和 VT_3 、 VT_4 、 R_v 组成,为加负反馈的差分放大器。



当满足 $R_y I_y > 50U_r$ 和 $R_x I_x > 50U_r$ 时, 差分电路为线性变换器, 有:

$$i_{E1,2} = I_y \mp i$$

$$i_1 = \alpha \left(I_y - u_y / R_y \right)$$

$$i_2 = \alpha \left(I_y + u_y / R_y \right)$$
同理有:
$$\begin{cases} i_3 = \alpha \left(I_x + u_x / R_x \right) \\ i_4 = \alpha \left(I_x - u_x / R_x \right) \end{cases}$$



(3) 双平衡差分电路

(乘法器核心电路)

 $VT_9 VT_{10}$ 由VT₅、VT₆、VT₇、VT₈、R_C组成

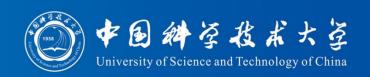
$$u_{0} = V_{CC} - R_{C} (i_{5} + i_{7}) - \left[V_{CC} - R_{C} (i_{6} + i_{8}) \right] = R_{C} \left[(i_{6} - i_{5}) - (i_{7} - i_{8}) \right]$$

由第2章差分电路分析法,有:

$$i_{4}-i_{3}=-2\alpha u_{x}/R_{x}$$

$$(i_6 - i_5) = -\alpha i_3 \tanh(u/2U_r)$$
$$(i_7 - i_8) = -\alpha i_4 \tanh(u/2U_r)$$

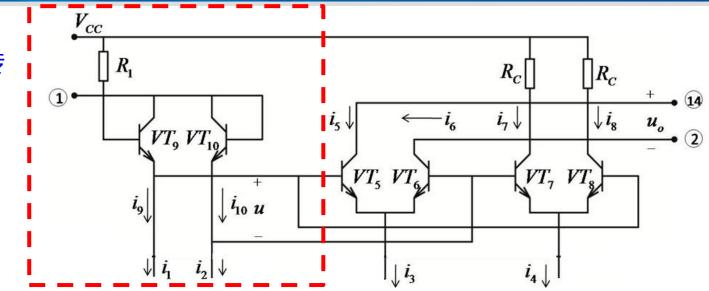
$$\implies u_0 = \alpha R_C (i_4 - i_3) \tanh \left(\frac{u}{2U_r}\right) = -\frac{2\alpha^2 R_C u_x}{R_x} \tanh \left(\frac{u}{2U_r}\right)$$



(4) Y通道非线性转 换电路 ($u_v \rightarrow u_o$)

由VT₉、VT₁₀、R₁组成

 VT_9 、 VT_{10} 接成二极 管形式, β 较高。



$$i_{9} \approx i_{1} = \alpha \left(I_{y} - u_{y} / R_{y} \right) \qquad i_{10} \approx i_{2} = \alpha \left(I_{y} + u_{y} / R_{y} \right)$$

$$u = u_{BE10} - u_{BE9} = U_{r} \ln \left(i_{10} / i_{9} \right) = U_{r} \ln \left(i_{2} / i_{1} \right)$$

$$\tanh \left(\frac{u}{2U_{r}} \right) = \frac{\exp \left(u / U_{r} \right) - 1}{\exp \left(u / U_{r} \right) + 1} = \frac{i_{10} / i_{9} - 1}{i_{10} / i_{9} + 1} = \frac{i_{10} - i_{9}}{i_{10} + i_{9}} = \frac{i_{2} - i_{1}}{i_{2} + i_{1}} = \frac{u_{y}}{I_{y} R_{y}}$$

$$\therefore u_0 = -\frac{2\alpha^2 R_C u_x}{R_x} \cdot \frac{u_y}{I_y R_y} = -\frac{2\alpha^2 R_C}{I_y R_y R_x} u_x u_y$$

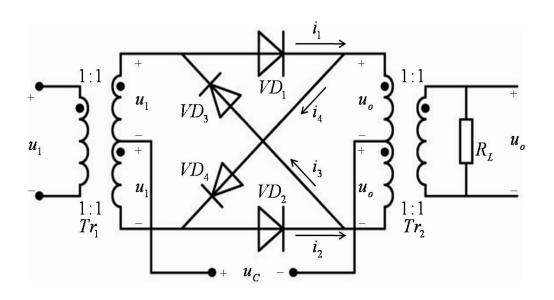


作业: 5.1



准模拟乘法器:此类电路的输出频谱中除含有 $\omega_2 \pm \omega_1$ 频率成分外,还含有的组合频率成分 $n\omega_2 \pm m\omega_1$ 。如果这两种频谱不重叠且相距较远,则可用中心频率适当的滤波器把无用的组合频率成分滤除掉,留下 $\omega_2 \pm \omega_1$,实现乘法功能。

5.3.1 双平衡二极管准模拟乘法器

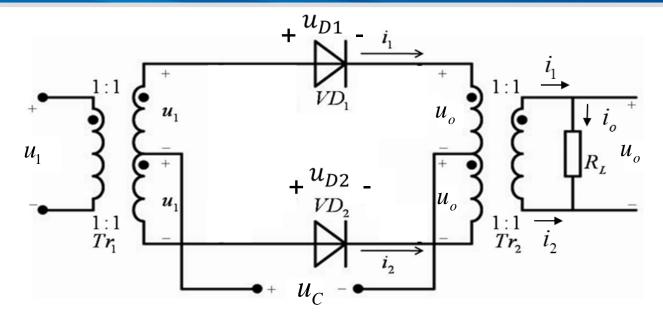


1、电路组成:

- ①4个二极管: $U_{\tau}=0$, 导通电导 g;
- ②基准电压: $u_C = U_C \cos \omega_C t$;
- ③待变换信号: u_1 ,输出信号: u_o ;
- $(4)U_C >> U_1, U_O$, 即4个二极管的通断完全受控于 u_C ;
- ⑤ T_r: 高频变压器;
- T_{r_i} : $\begin{cases} u_1$ -音频信号: 低频变压器 u_1 -高频信号: 高频变压器



2、工作原理



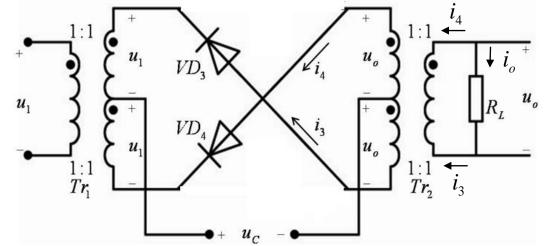
① *u_C* 正半周, VD₁、VD₂导通,有:

$$\begin{cases} u_{D1} = u_1 + u_C - u_o & \Longrightarrow & i_1 = i_{D1} = g \left(u_1 + u_C - u_o \right) \\ u_{D2} = -u_1 + u_C + u_o & \Longrightarrow & i_2 = i_{D2} = g \left(-u_1 + u_C + u_o \right) \\ \Longrightarrow u_o = i_o R_L = R_L \left(i_1 - i_2 \right) = 2g R_L \left(u_1 - u_o \right) \end{cases}$$
 (1)



② *u_C* 负半周, VD₃、VD₄导通,有:

$$\begin{cases} u_{D3} = -u_1 - u_C - u_o \\ \Rightarrow i_3 = i_{D3} = g(-u_1 - u_C - u_o) \\ u_{D4} = u_1 - u_C + u_o \\ \Rightarrow i_4 = i_{D4} = g(u_1 - u_C + u_o) \end{cases}$$



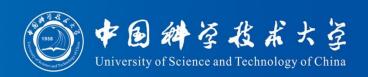
$$\Rightarrow u_o = i_o R_L = R_L (i_3 - i_4) = -2gR_L (u_1 + u_o) \qquad (2)$$

$$K^{+}(\omega_{C}t), K^{-}(\omega_{C}t)$$

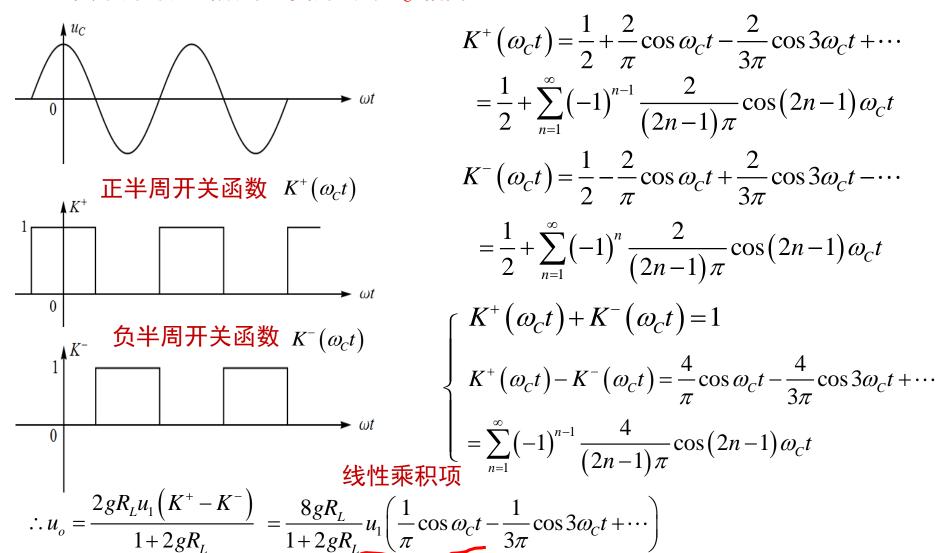
联合(1)(2)式有:

分别为正、负半周开关函数

$$u_{o} = 2gR_{L}(u_{1} - u_{o})K^{+}(\omega_{C}t) + 2gR_{L}(-u_{1} - u_{o})K^{-}(\omega_{C}t)$$
$$= 2gR_{L}u_{1}(K^{+} - K^{-}) - 2gR_{L}u_{o}(K^{+} + K^{-})$$

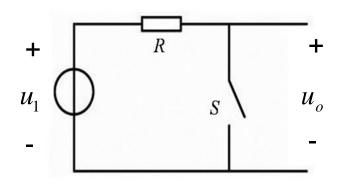


正、负半周开关函数的重复周期与 u_C 相同





5.3.2 并联开关式准模拟乘法器



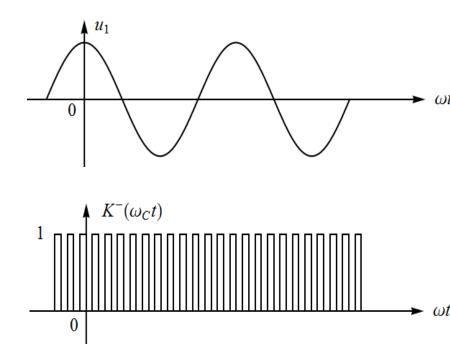
工作原理

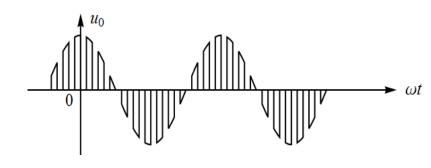
并联开关 $S \in U_C \cos \omega_C t$ 控制

$$u_o = u_1 K^-(\omega_C t)$$

$$= u_1 \left(\frac{1}{2} - \frac{2}{\pi} \cos \omega_C t + \frac{2}{3\pi} \cos 3\omega_C t - \cdots \right)$$

$$- \frac{2}{\pi} u_1 \cos \omega_C t \quad -$$
线性乘积项







1. 二极管开关准模拟乘法器

- ①环形连接的二极管作为开关
- ② $u_2 = U_C \cos \omega_C t$ 或是经过整形后、有相同重复周期的方波

③满足
$$R_D^+ << R_1 << R_D^- << (1+\beta)R_E$$

$$(1+eta)R_E$$
 — 放大器输入电阻 R_D^- — 二极管反向电阻 R_D^+ — 二极管正向导通电阻

工作原理

- ① u_2 正半周,4个二极管导通, 总导通电阻为 R_D^+ ,有:
- ② u_2 负半周,4个二极管截止,总反向通电阻为 R_D^- ,有:

$$u_{ab} = \frac{R_D^+}{R_1 + R_D^+} u_1 \approx 0$$

$$u_{ab} = \frac{R_D^- / / (1 + \beta) R_E}{R_1 + R_D^- / / (1 + \beta) R_E} u_1 \approx u_1$$

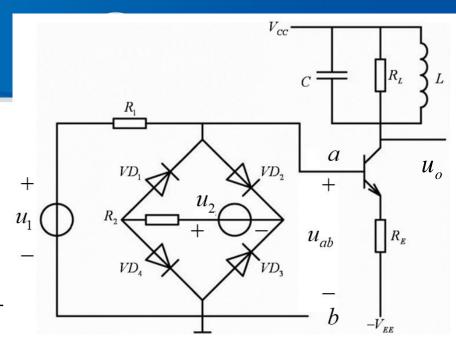
$$\Rightarrow u_{ab} = u_1 K^- (\omega_C t)$$

$$u_{ab} = u_1 K^-(\omega_C t)$$

$$= u_1 \left(\frac{1}{2} - \frac{2}{\pi} \cos \omega_C t + \frac{2}{3\pi} \cos 3\omega_C t - \cdots \right) + u_1$$

$$-\frac{2}{\pi} u_1 \cos \omega_C t - \text{线性乘积项}$$

$$A_u = -\frac{\beta R_L}{r_{be} + (1 + \beta)R_E} \approx -\frac{R_L}{R_E}$$



①调幅器

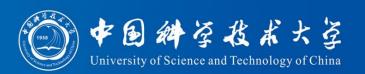
 $u_1 = U_1 \sum_{k=0}^{n} a_k \cos k\Omega t$ 为低频信号,输出回路调谐于 ω_c ,带宽 $BW > 2n\Omega$,

即在通带内的频响是平坦的,则有:

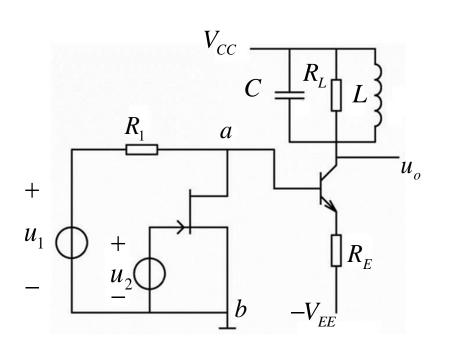
$$u_o = V_{CC} + \frac{2U_1 R_L}{\pi R_E} \left(\sum_{k=0}^n a_k \cos k\Omega t \right) \cos \omega_C t$$

②混频器: $u_1 = U_1 \left(\sum_{k=0}^n a_k \cos k\Omega t \right) \cos \omega_1 t$ 为高频信号,输出回路调谐于 $\omega_C - \omega_1$,带宽 $BW > 2n\Omega$,即在通带内的频响是平坦的,则有:

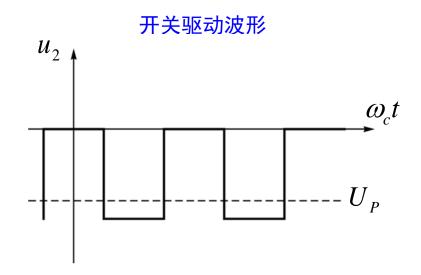
$$u_o = V_{CC} + \frac{U_1 R_L}{\pi R_E} \left(\sum_{k=0}^n a_k \cos k\Omega t \right) \cos \left(\omega_C - \omega_1 \right) t$$



2. 场效应管开关准模拟乘法器



原理电路



- ① u_2 为高电平(0V) 时,场效应管充分导通,开关闭合, $u_{ab}=0$ 。
- ② u_2 为低电平($u_2 < U_P$) 时,场效应管截止,开关断开, $u_{ab} = u_1$ 。



作业: 5.5(a),5.6