

阶 跃 恢 复 二 极 管 谐 波 发 生 器

——《固体微波技术》增刊

《固体微波技术》編輯組

阶跃恢复二极管谐波发生器

（内部发行·注意保存）

印刷者 上海纺织工业局印刷所

出版日期 一九七二年一月

工本费0.40元

毛主席语录

中国人民有志气，有能力，一定要在不远的将来，赶上和超过世界先进水平。

打破洋框框，走自己工业发展道路。

目 录

I 引言	1
II 开关电抗倍频器 (SRM)	2
1. 一般说明	2
2. 工作原理	2
谐振网络	6
末级滤波	8
设计方法归纳	11
倍频器设计方法	13
二极管选择	15
脉宽的要求	21
元件数值, 脉冲发生器	22
匹配网络	24
末级滤波	26
偏置	28
偏置网络	28
III 倍频器的设计举例	29
设计举例 1	30
设计举例 2: $\times 5$ 及 $\times 10$ 的 S 波段倍频器	37
设计举例 3: S 波段倍频器	41
设计举例 4: C 波段倍频器	48
设计举例 5: X 波段倍频器	51
IV 混合集成阶跃恢复二极管组件 (SRD)	54
使用混合集成的理由	54
装置说明	55

频率梳状发生器的应用	58
SRD 组件作等幅倍频器 应用	59
举例 1: 四分之一波长耦合倍频器	59
举例 2	64
使用SRD组件的特殊倍频器	66
V 特别论题	69
倍频器稳定性	69
稳定度和偏置电路	71
倍频器相位噪声特性	72
参考资料	74
附录 A	78
附录 B	84
符号说明	90
效率符号说明	92
脉冲发生器符号说明	92

阶跃恢复二极管谐波发生器

上海无线电廿六厂 译

上海无线电十七、廿六厂 校

I 引 言

阶跃恢复二极管 (SRD) 已得到广泛使用, 主要有二个用途: 其一, 是用于谐波倍频器和梳状频谱发生器中; 其二, 是用来产生脉冲和脉冲成形。

阶跃恢复二极管倍频与众所周知的变容管倍频器是极不相同的。由于变容管倍频器产生所需谐波的主要机理是变容管的非线性反向电容的变化, 所以变容管倍频器可列为可变电抗倍频器 (VRM)。与此相反, 阶跃恢复二极管倍频器可以视为开关电抗倍频器 (Switching Reactance Multiplier, SRM), 这是由于它的工作基础在于阶跃恢复二极管具有二个分离的电抗状态并能迅速地在这二个状态间转换。二极管正向偏置时的大电容状态及反向偏置时的小电容状态相对应的这二个状态, 使人们能把阶跃恢复二极管看作简单的、高效的、可控制电荷的开关。

在过去几年中, 这种形式的倍频器受到了广泛的研究⁽¹⁻¹⁴⁾。一般的结论是: 可以制造出相当简单的、高效率的、稳定的、宽带的、频率范围为数十兆周到数十千兆周的高次倍频器。

本文叙述了理论上的基本考虑及实际的设计技术, 并列举了一些倍频器设计实例, 这些在设计开关电抗倍频器方面

都是有用的。实例中包括了大家熟悉的集中参数电路或分布参数电路中使用通常封装的阶跃恢复二极管和混合集成阶跃恢复二极管电路组件。后者与普通的电路技术相比具有许多优越性，特别在比较高的频率和比较高的倍频比的情况下，两极管和电路的相互作用变得十分临界需要非常精确的控制。

这些优越性使人们可以制造出新型的倍频器及梳状频率发生器组件。本文也谈到了混合集成组件的特性及其应用。这样使设计者能广泛选择设计方法，从中挑选一个最适合使用目的的方案。最后本文将概括一些关于倍频器噪声、带宽和稳定性的重要设计条件和使倍频器能在宽的温度范围及各种短路终端条件下稳定工作的条件。

I 开关电抗倍频器 (SRM)

1. 一般说明

典型的开关电抗倍频器方框图及其各级所产生的波形图如图 1 所示。

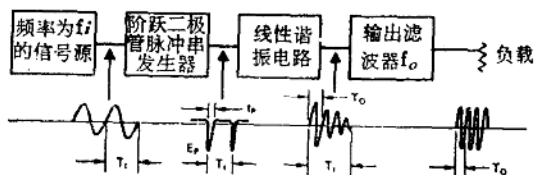


图 1 典型的开关电抗倍频器

频率为 f_i 的信号源把能量输到阶跃恢复二极管“脉冲发生器”电路。该电路把每输入周期的能量变换为一个每输入

周期产生一次的、狭的、大幅度的电压脉冲。此脉冲的能量被用来激发有载 Q 值为 $\frac{\pi}{2} \cdot n$ 的谐振电路。谐振电路把脉冲变换成输出频率为 $f_o = n f_i$ 的阻尼振荡波形。然后,能量经过滤波加到负载上,得到基本上纯的输出频率的等幅波。

为了有效地得到这一过程,必须使二极管产生的脉冲宽度 t_p 小于输出频率 $\left(t_p < \frac{1}{f_o}\right)$ 的周期。可以产生这样脉冲的阶跃恢复二极管的输出频率约已到达18GHz。

2. 工作原理

a) 二极管特性:假定阶跃恢复二极管先强烈地正向激励,然后再强烈地反向激励。对于正向及反向时的等效电路如图2所示是一只电容器。为简单化起见,假定由 $C_{正向}$ 到 $C_{反向}$ 的开关过程是在零时间间隔内发生的。

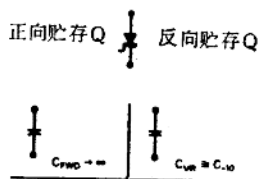


图2 简化的阶跃恢复二极管等效电路

b) 脉冲串发生器:二极管是安装在图3所示的网络中。这个网络通过激励电感 L 贮存能量,恰好先于二极管电容从 C_{FWD} 到 C_{VR} 转换之前,在每一输入周期产生一个大幅度窄脉冲。电感中贮存的能量为 $\left(\frac{1}{2} L I_p'^2\right)^*$ 。该能量经开关后在 $C_{反向}$ 上,呈现如高度为 E_p' 、宽度为 t_p' 的半个正弦脉冲。

(* 式中 I_p' 是在 I 层中电荷趋于零时流过 L 和二极管的峰值流出电流。)

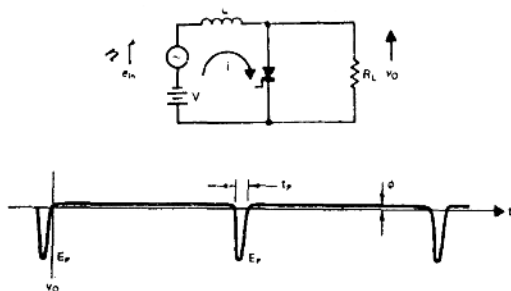


图3 简化的脉冲串发生器电路

假定这个脉冲能量等于贮存在电感中的能量（在 LC 电路上是轻载），于是：

$$\frac{1}{2} I_p'^2 L \cong \frac{1}{2} C_{\text{反向}} E_p'^2$$

和

$$E_p' \cong I_p' \sqrt{\frac{L}{C_{\text{反向}}}}$$

脉冲宽度 t_p' 是由 LC 电路的谐振频率确定，为：

$$t_p' \cong \pi \sqrt{LC_{\text{反向}}}$$

负载增加（通过降低 R_L ）降低了脉冲的高度 E_p' 并增宽了脉冲宽度 t_p' 。

负载脉冲高度变为：

$$E_p = E_p' \exp \frac{-\pi \xi}{2\sqrt{1-\xi^2}}$$

负载脉冲宽度变为：

$$t_p = \frac{\pi \sqrt{LC_{\text{反向}}}}{\sqrt{1-\xi^2}}$$

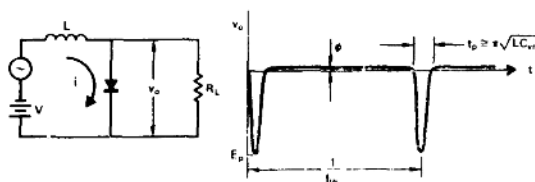
在上列二式中, ξ 是阻尼系数, 其电路的关系式为:

$$\xi = \frac{1}{2R_L} \sqrt{\frac{L}{C_{\text{反向}}}}$$

脉冲串中功率将由下式给出 (假如 $\xi \ll 1$):

$$P_{\text{脉冲串}} = \frac{\pi \xi E_p^2 f_i C_{\text{反向}}}{\sqrt{1 - \xi^2}} \cong \pi \xi E_p^2 f_i C_{\text{反向}}$$

图 3 所示的脉冲串可以用一个以傅里叶级数描述的波形 (图 4) 为基础的等效的发生器表示。



“脉冲发生器输出电压” 时域

$$V_o \cong -E_p \sin N\omega t \quad \text{对于 } t = 0 \text{ 到 } t = t_p$$

$$V_o = \phi \quad \text{对 } t = t_p \text{ 到 } t = \frac{1}{f_i}$$

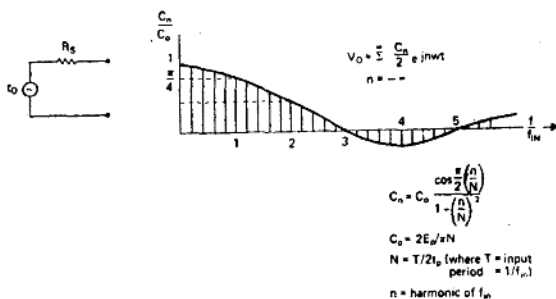


图 4 脉冲波形及其傅里叶级数

线状频谱在 $f = \frac{3}{2t_p}$ 处有第一个零点（假定是正弦状脉冲）。二任意线之间线频谱的“平坦度”取决于脉冲宽度；脉冲越狭，第一个“零交叉点”（Zero crossing）越高；在极限情况下，假如结构上可能，宽度为零的脉冲将是平坦幅度至 $f = \infty$ 的线状频谱。目前为止实际可能达到的最窄的脉冲为 $t_p \approx 70$ 微微秒（如第 IV 节将讨论的混合集成倍频器组件）。

图 3 和图 4 所示的脉冲串本身可用作“梳状”发生器。对系统振幅与频率校准、锁相系统及参考频率发生器来说，它在 f_i 的每次倍频时产生一个谱线。它也是等幅倍频器中的关键元件。在等幅倍频应用中，脉冲宽度选择在如下范围内：

$$\frac{1}{2f_0} < t_p < \frac{1}{f_0}$$

式中

$$f_0 = nf_i$$

该脉冲加至一个适当的谐振输出网络（与此相反，在“梳状”发生器中是加到电阻负载上）。谐振网络的有负载 Q 值调整到接近等于 $(\pi/2)n$ ，所以，脉冲中的大部分能量就在时间等于几个输出频率的周期中传递（或一个输入频率周期）。这样，脉冲中的大部分能量（ $\approx \frac{1}{2} E_p^2 C_{VR}$ ）将在 $nf_i = f_0$ 时传递。

常用的一些输出谐振网络将在下面讨论。

谐振网络：

当阶跃恢复二极管脉冲发生器端接一宽带的电阻性负载时，输出是脉冲串形波形及其相应的梳状频谱。当其端接一

谐振网络时（图 5），理想的输出是能量相同，但它集中在 $f_0 = nf_1$ 左右。

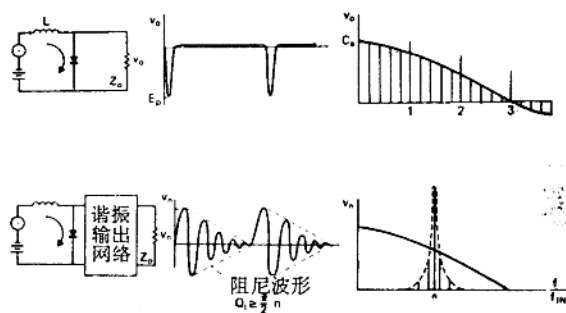


图 5

三种可能的输出谐振网络如图 6 所示。任意一种网络都产生所需的图 5 所示的阻尼电压波形，在这种波形的脉冲

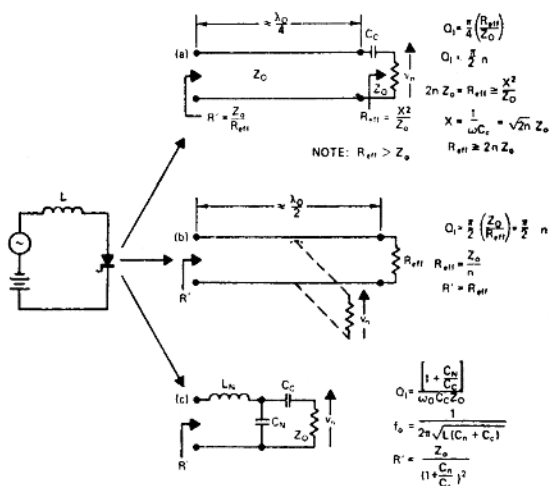


图 6 可能的谐振输出网络

中，大部分能量*集中在 $f_0 = nf_1$ 附近。

这个谐振网络也可视为倍频器输出滤波器的第一节。其余各节用来提供对邻近 $n+1$ ， $n-1$ 次旁频的较佳抑制。

末级滤波：

图 5 所示的谐振网络的输出仍包括有相当高的 $n+1$ 次和 $n-1$ 次旁频。在实际的倍频器中，必须进一步滤波以降低这些旁频。图 6 所列举的网络与各种滤波器的偶合可供灵活应用。图 6 a 及图 6 c 的例子偶合到滤波器是按 E 场偶合；图 6 b 是以 H 场偶合的。 E 和 H 场偶合间的区别更清楚的列于图 8 中，图中给出了各类完整的倍频器原型的一些举例。在任一情况下，输出网络的设计程序基本上是相同的：滤波器的设计是按 $50\ \Omega$ 系统单独进行的，即 $50\ \Omega$ 的发生器和 $50\ \Omega$ 的负载；阻尼波形发生器的设计接至 $50\ \Omega$ 的负载要是最佳的，滤波器和阻尼波形发生器一起结合给出一个完全的等幅倍频器。

对这种设计方法有效性的局限：是假定谐振网络的输出起一个电阻源作用的。但这是我们忽略的一个变量。假定滤波器的分数带宽远小于 $\frac{1}{n}\left(\frac{bw}{f_0} \ll \frac{1}{n}\right)$ ，这就并不是一个麻烦事了。此时，谐振网络 Q 值的变化将不致影响倍频器的响应。

需要更为通用的输出滤波器的设计，但暂时尚无。曾经成功地用于阻尼波网络的滤波器原型如图 9 所示。

*对于 $Q_L = \frac{n\pi}{2}$ ，脉冲的76%的能量包含在 nf_1 谱线上。这就假定二极管的 R_s 等于零。 R_x 的损耗可以认为微扰。

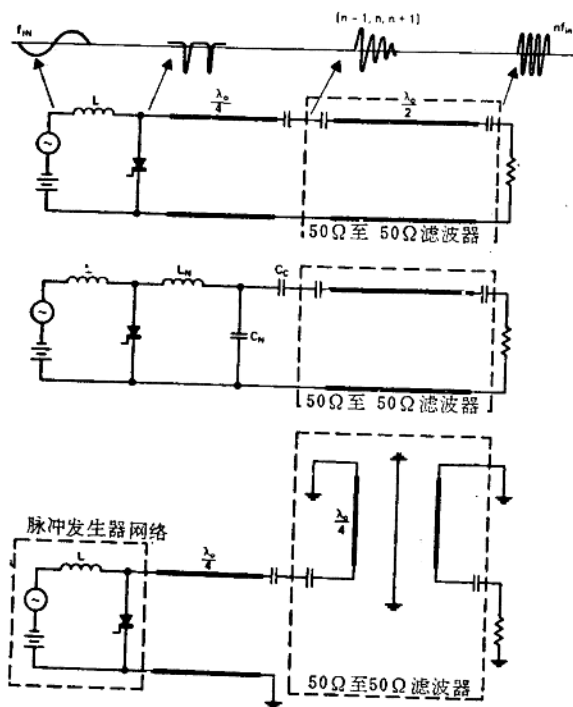


图 7 完整倍频器原型举例

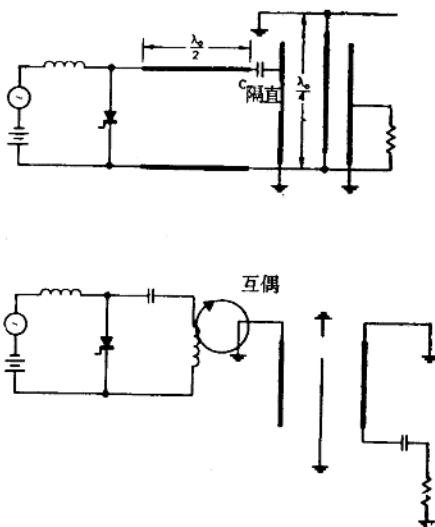
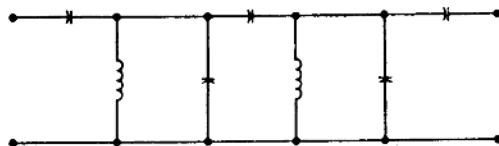
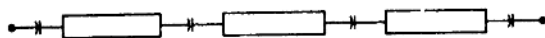


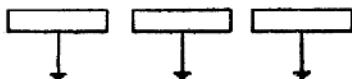
图 8 完整倍频器原型举例



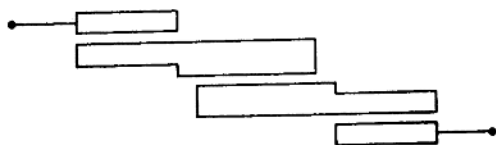
a 集中元件—电容耦合滤波器



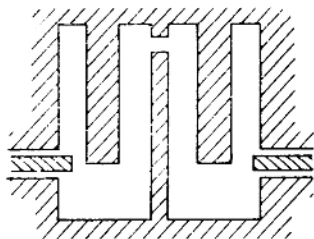
b 电容间隙耦合半波滤波器



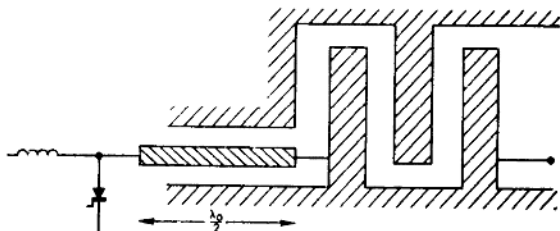
c 中心支点接地电容间隙耦合



d 边缘偶合带线滤波器



e 探针偶合同轴腔滤波器



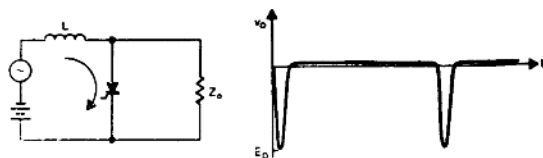
f 半波阻尼环路与滤波器接连

图 9 倍频器输出滤波电路

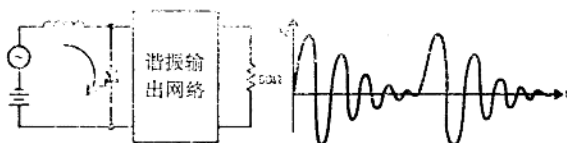
设计方法归纳：

图10所示为阶跃恢复二极管倍频器的设计方法的归纳。这个方法的每一步骤，可以验证其在 50Ω 系统中的特性。在

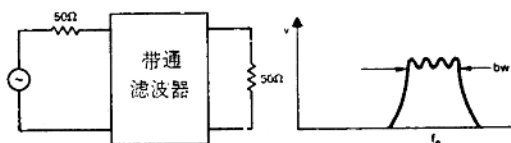
实际设计过程中，这是一个重要的因素。在下节中将更详细地考虑设计的每一步骤。



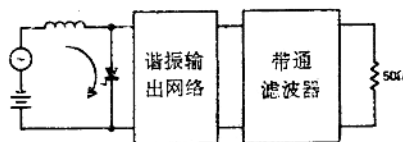
1. 接到 $50\ \Omega$ 负载的脉冲形成电路的设计



2. 接到 $50\ \Omega$ 系统的阻尼波形设计



3. 在 $50\ \Omega$ 系统中根据所要求频率的选择 f_0 设计滤波器



4. 阻尼波发生器与滤波器联结

图10 阶跃恢复二极管倍频器设计归纳