

第8章 信号的产生

- 8.1 信号源概述
- 8.2 正弦、脉冲及函数发生器
- 8.3 锁相频率合成信号的产生
- 8.4 直接数字合成技术
- 8.5 合成信号源简介

第1页

8.1.1 信号源在电子测量中的作用和组成

1. 信号源的作用

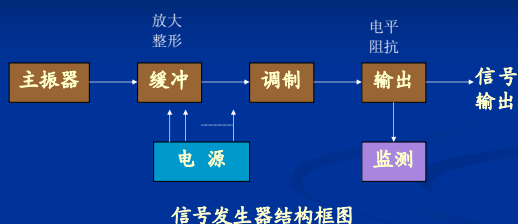
信号源是能够产生不同频率、不同幅度的规则或不规则波形的**信号发生器**。

信号源的用途主要有以下三方面：

- ☆ 激励源。
- ☆ 信号仿真。
- ☆ 标准信号源。

第2页

2. 信号源的组成



第3页

8.1.2 信号源的分类

1. 按频率范围大致可分为六类：

- ✦ 超低频信号发生器 0.0001Hz ~ 1000Hz;
- ✦ 低频信号发生器 1Hz ~ 1MHz;
- ✦ 视频信号发生器 20Hz ~ 10MHz;
- ✦ 高频信号发生器 200KHz ~ 30MHz;
- ✦ 甚高频信号发生器 30KHz ~ 300MHz;
- ✦ 超高频信号发生器 300MHz以上。

第4页

2. 按输出波形,大致可分为:

- ✦ 正弦波形发生器;
- ✦ 脉冲信号发生器;
- ✦ 函数信号发生器;
- ✦ 噪声信号发生器。

3. 按照信号发生器的性能指标可分为:

- ✦ 一般信号发生器; 指标要求低
- ✦ 标准信号发生器; 校准用

第5页

8.1.3 正弦信号源的性能指标

1. 频率特性

- ◆ (1) 频率范围
- ◆ (2) 频率准确度 (实际值、标称值)

$$\alpha = \frac{f - f_o}{f_o} = \frac{\Delta f}{f_o} \times 100\%$$

- ◆ (3) 频率稳定度 (15min、3h)

$$\delta = \frac{f_{\max} - f_{\min}}{f_o} \times 100\%$$

第6页

2. 输出特性

- ◆ (1) 输出电平范围。
- ◆ (2) 输出电平的频响(有效频率范围内电平稳定度)
- ◆ (3) 输出电平准确度
- ◆ (4) 输出阻抗(50、75、150、600、5k)
- ◆ (5) 输出信号的非线性失真系数和频谱纯度。

3. 调制特性

调制特性的衡量指标主要包括调制频率, 调幅系数, 最大频偏, 调制线性等。

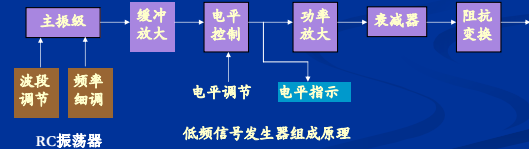
第7页

8.2 正弦、脉冲及函数发生器

8.2.1 正弦信号发生器

1. 低频信号发生器

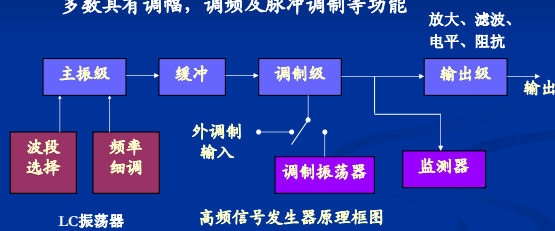
- ◆ 低频信号发生器频率范围一般为20Hz~20KHz, 故又称**音频信号发生器** 分波段调节 (差频式不分波段)



第8页

2. 高频信号发生器

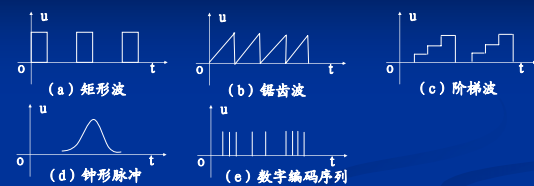
- ◆ 高频信号发生器输出频率范围一般在300KHz~1GHz, 大多数具有调幅, 调频及脉冲调制等功能



第9页

8.2.2 脉冲信号发生器

- ◆ 脉冲信号: 持续时间短, 按特定规律变化的信号。常见的脉冲信号有矩形、锯齿形、阶梯形、钟形和数字编码序列等:



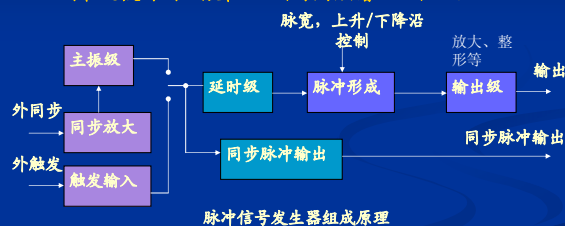
常见的脉冲信号

- ◆ 脉冲发生器的分类(根据用途和产生脉冲的方法): 通用脉冲发生器、快速(广播)脉冲发生器、函数发生器、数字可编程脉冲发生器及特种脉冲发生器等。

第10页

1. 通用脉冲发生器

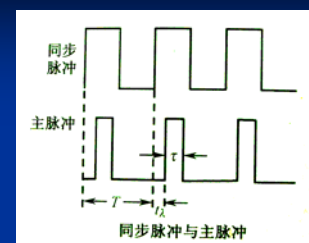
- ◆ 通用脉冲发生器能够满足一般测试的要求, 能够调节脉冲重复频率、脉冲宽度、输出幅度及极性。脉冲持续时间和过渡时间一般在1ns(可用频谱1GHz)以上



脉冲信号发生器组成原理

主振级由恒流源射极耦合自激多谐振荡器或正弦振荡及限幅放大构成

第11页

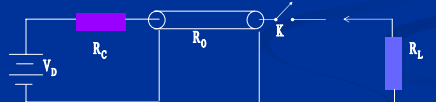


同步脉冲超前, 如测量脉冲波形时, 同步脉冲可以让示波器提前扫描

第12页

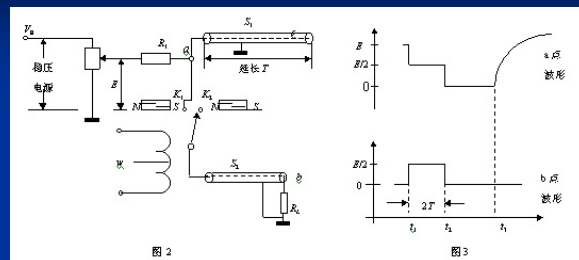
2. 快速（广谱）脉冲发生器

- 在时域测试中，快速脉冲信号发生器用来提供广谱的激励信号，尤其在数字通信、微波网络、宽带元器件的时域测试中，脉冲信号发生器相当于频域测试中的扫频信号源。
- 快速脉冲信号的产生技术主要有：水银开关脉冲发生器、雪崩晶体管脉冲发生器、阶跃恢复二极管脉冲发生器以及隧道二极管脉冲发生器（15ps、可用频谱30GHz）等。



水银开关脉冲发生器原理

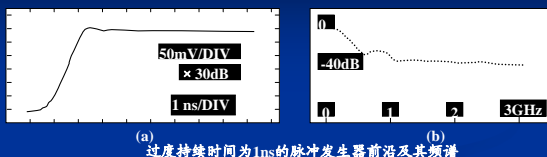
第13页



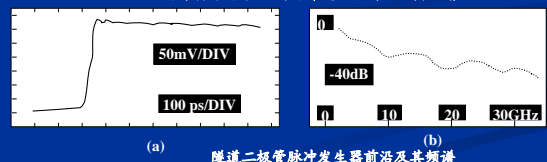
重复频率较低

第14页

例如一个前沿上升时间为1ns的脉冲，其可用频谱分量为1GHz，而隧道二极管脉冲发生器产生的脉冲前沿上升时间快达15ps，则其可用频谱可以高达30GHz。



(a) 过度持续时间为1ns的脉冲发生器前沿及其频谱



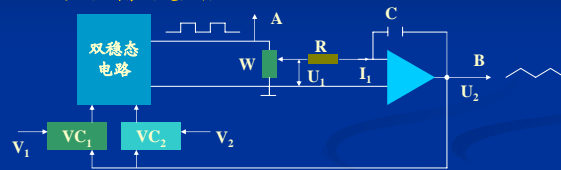
(a) 隧道二极管脉冲发生器前沿及其频谱

第15页

8.2.3 函数信号发生器

1. 多波形信号发生原理

◆ (1) 方波三角波发生器



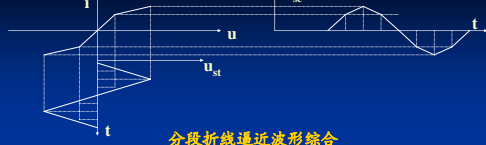
方波、三角波发生器原理框图

设充放电电流为 I ，输出三角波的频率为 f_{sc} ，则：

$$f_{sc} = \frac{I}{2C(V_1 - V_2)} \quad I = U_1/R \quad \text{调整 } V \text{ 改变三角波斜率，改变周期}$$

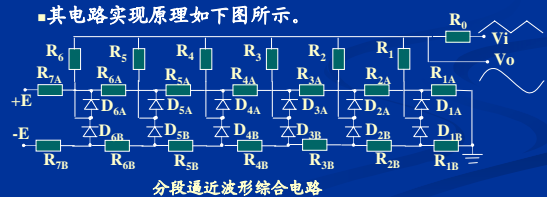
第16页

◆ (2) 正弦波形成电路



分段折线逼近波形综合

其电路实现原理如下图所示。

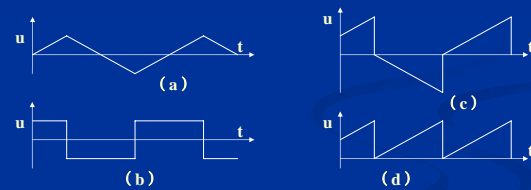


分段逼近波形综合电路

第17页

◆ (3) 锯齿波形成电路

锯齿波可以通过方波与三角波而获得，将下图中 (a) 所示三角波与图 (b) 所示方波直接叠加就可得到图 (c) 所示的交错锯齿波，再经过全波整流，就得到了图 (d) 所示的锯齿波。

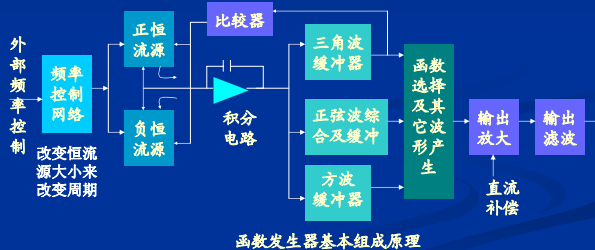


锯齿波的获得原理

第18页

2. 函数发生器的性能和组成

- 函数发生器能输出方波, 三角波, 锯齿波, 正弦波等波形, 具有较宽的频率范围 (0.1Hz ~ 几十MHz) 及较稳定的频率。



函数发生器基本组成原理

第19页

- 随着科学技术的发展, 对信号频率的稳定度和准确度提出了愈来愈高的要求。例如在手机通信系统中, 信号频率稳定度的要求必须优于 10^{-6} ; 在卫星发射中, 要求更高, 必须优于 10^{-8} 。
- 在以RC、LC为主振级的信号源中, 频率准确度只达 10^{-2} 量级, 频率稳定度只达 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ 量级, 远远不能满足现代电子测量和无线电通信等方面的要求。另一方面, 以石英晶体组成的振荡器日稳定度优于 10^{-8} 量级, 但是它只能产生某些特定的频率。为此需要采用频率合成技术

第20页

8.3 锁相频率合成信号的产生

8.3.1 频率合成的基本概念

1. 频率合成原理



频率合成原理

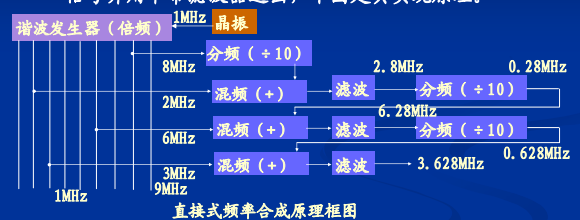
频率的代数运算是通过倍频、分频及混频技术来实现。

第21页

2. 频率合成分类及特点

(1) 直接频率合成

通过频率的混频、倍频和分频等方法来产生一系列频率信号并用窄带滤波器选出, 下图是其实现原理。



直接式频率合成原理框图

优点: 频率切换迅速, 相位噪声很低。

缺点: 电路硬件结构复杂, 体积大, 价格昂贵, 不便于集成化。

第22页

(2) 锁相式频率合成

- 一种间接式的频率合成技术。它利用锁相环 (PLL) 把压控振荡器 (VCO) 的输出频率锁定在基准频率上, 这样通过不同形式的锁相环就可以在一个基准频率的基础上合成不同的频率。

- 优点: 易于集成化, 体积小, 结构简单, 功耗低, 价格低等优点。

- 缺点: 频率切换时间相对较长, 相位噪声较大。

(3) 直接数字合成 (DDS)

- 是基于取样技术和数字计算技术来实现数字合成, 产生所需频率的正弦信号

- 优点: 能实现快捷变和小步进, 且集成度高, 体积小

- 缺点: 频率上限较低 (D/A), 杂散也较大。

第23页

3. 频率合成技术的发展

各种频率合成方式的综合:

直接式、间接 (锁相环) 式和直接数字式频率合成技术都有其优缺点, 单独使用任何一种方法, 很难满足要求。因此可将这几种方法综合应用, 特别是DDS与PLL的结合, 可以实现快捷变, 小步进及较高的频率上限。

第24页

8.3.2 锁相环（PLL）的基本概念

◆ 1. 锁相环基本工作原理及性能

- ◆ 锁相环是一个相位负反馈控制系统。该环路由鉴相器（PD）、环路滤波器（LPF）、电压控制振荡器（VCO）及基准晶体振荡器等部分组成。



锁定后 f_i 和 f_o 具有同等的稳定度、晶振级别

第25页

◆ 锁相环的主要性能指标：

- ◆ **同步带宽**：锁定条件下输入频率所允许的最大变化范围 f_i 的变化范围（表明了锁定状态下 VCO 的最大输出频率变化范围）

- ◆ **捕捉带宽**：环路最终能够自行进入锁定状态的最大允许的频差 未锁定到锁定 $\Delta f_o (=f_o - f_i)$ 的范围

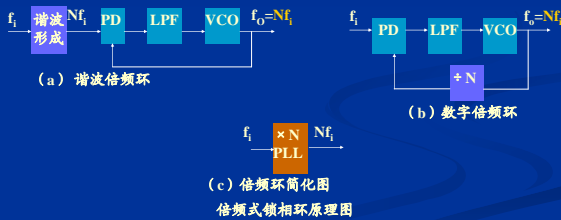
- ◆ **环路带宽**：锁相环的频率特性具有低通滤波器的传输特性（输入频率附近），其高频截止频率称为环路带宽。针对输入信号整体具有带通特性，窄带滤波

第26页

2. 锁相环的基本形式

◆ (1) 倍频式锁相环

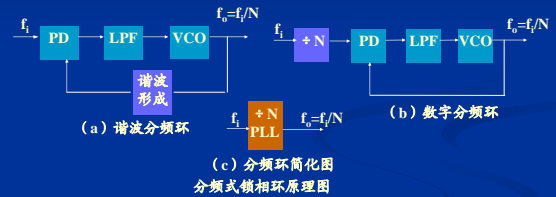
倍频环实现对输入频率进行乘法运算，主要有两种形式：谐波倍频环和数字倍频环



第27页

◆ (2) 分频式锁相环

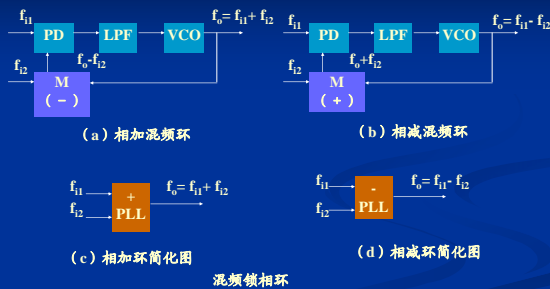
分频环实现对输入频率的除法运算，与倍频环相似，也有两种基本形式。



第28页

◆ (3) 混频式锁相环

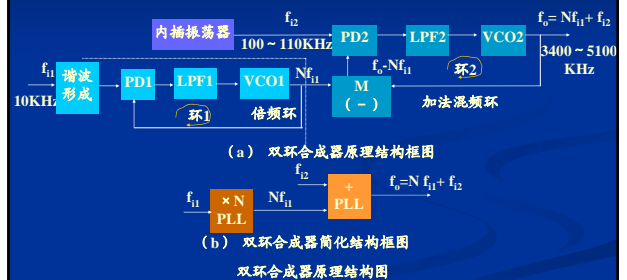
◆ 混频环实现对频率的加减运算



第29页

◆ (4) 多环合成单元

- ◆ 单环合成单元存在频率点数较少，频率分辨率不高等缺点，所以一个合成式信号源都是由多环合成单元组成



第30页

实例分析：十进频率合成器

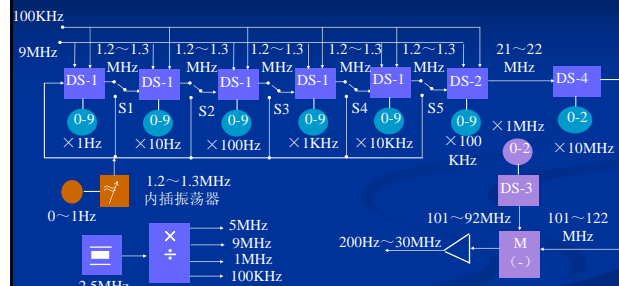
- 该频率合成器中采用了十进锁相合成单元，输出频率是采用十进数字盘来选择，它可以提供更高的输出频率准确度。目前十进频率合成器已作为一个标准频率源而获得广泛应用。

(1) 十进频率合成器组成

五个DS-1合成单元串联起来，其输出频率被送到合成单元DS-2，得到输出频率为21~22MHz，DS-2的输出加到合成单元DS-4，得到输出频率为101~122MHz，合成单元DS-3输出为101~92MHz，DS-3与DS-4的输出频率加到混频器M进行相减，最后得到200Hz~30MHz的输出频率

第31页

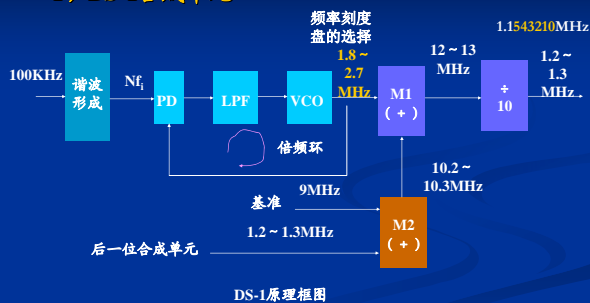
十进锁相式频率合成器组成框图



第32页

(2) 十进锁相合成单元

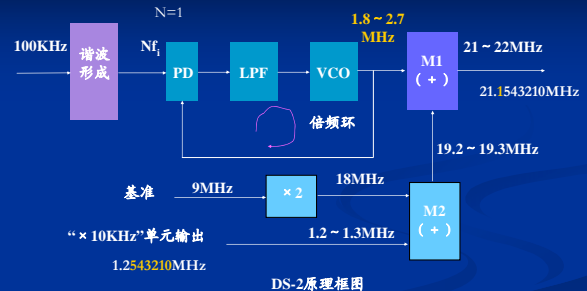
1) DS-1合成单元



DS-1原理框图

第33页

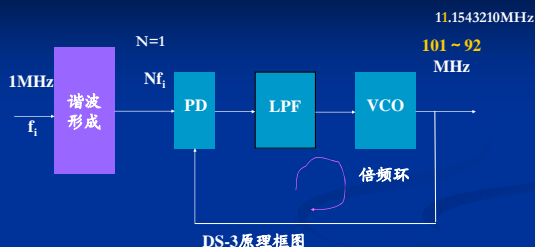
2) DS-2合成单元



DS-2原理框图

第34页

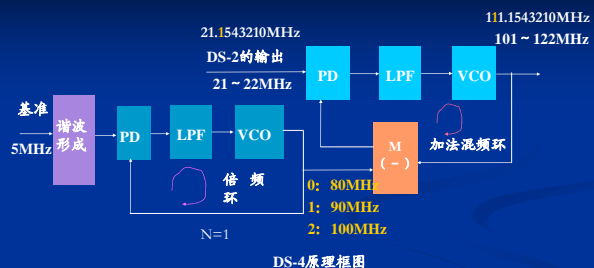
3) DS-3合成单元



DS-3原理框图

第35页

4) DS-4合成单元

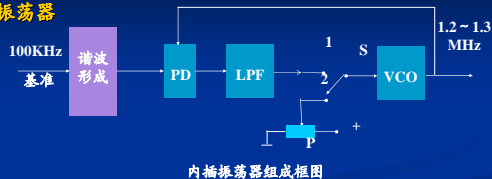


DS-4原理框图

第36页

(3) 输出频率的连续调节

- 为了使输出频率连续可调，频率合成器中加入了一个内插振荡器



内插振荡器组成框图

当选择开关S置于1时，内插振荡器是一个倍频环，它输出一个1.2MHz的固定点频，此时频率合成器只能输出离散频率。

当内插振荡器的开关S置于2时，VCO就作为一个频率连续可调的振荡器工作，调节电位器P，改变VCO的偏压，可使它的输出在1.2MHz~1.3MHz之间连续变化。

第37页

8.3.3 提高频率分辨率的锁相合成技术

1 提高频率分辨率的技术途径

频率增量越小，转换时间越长，转换时间的计算一般采用经验公式8.9。（数字式倍频环增量为 f_i ）

$$t_e = 25 / f_i$$

如果简单在倍频环后加分频器M，转换时间不变，分辨率提高M倍，但导致减小输出频率范围。

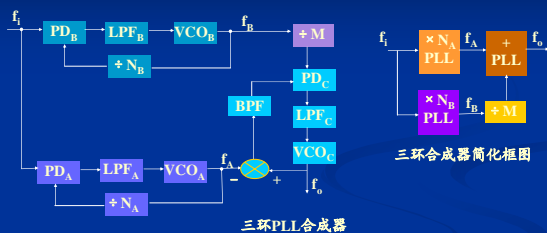
在保证转换时间不变的前提下，提高频率分辨率的途径主要有：多环频率合成法；小数分频法、微差混频法。

分辨率和转换时间之间的矛盾

第38页

2 多环频率合成法

- 下面是一个三环锁相频率合成器原理框图



第39页

- 环A输出频率为：

$$f_A = N_A f_i$$

分辨率可达到 f_i/M

转换时间由三个环的最长时间决定，A、B环参考频率 f_i ，C环参考频率为： $f_B/M = (N_B/M)f_i$ ，设置 N_B 大于M，则C环参考频率大于 f_i ，所以三个环转换时间由A、B环决定，为 $25/f_i$ ，并没有增长。

- 环B的输出频率为：

$$f_B = N_B f_i$$

由环C有：

$$f_o - f_A = f_B / M$$

因此，合成器的输出频率为：

$$f_o = (N_A + N_B / M) f_i$$

小数分频技术可以实现 μHz 量级的频率分辨率。

第40页

8.3.4 扩展频率上限的锁相合成技术

- 扩展频率上限的方法：

可变分频器上限频率较低，限制了输出频率上限
前置分频器法；多模分频器法。

1 前置分频器法

- 前置分频法是在反馈回路加一个前置的固定分频器，先将输出频率进行固定模数为M的分频，然后再送到可编程分频器进行可变的N分频。



固定分频器比可变分频器工作频率上限高

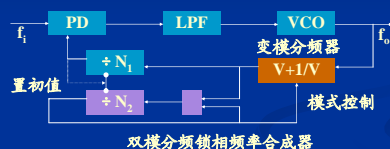
模数控制
前置分频锁相频率合成器

该方法使频率上限提高了M倍，但频率分辨率下降了M倍。

第41页

2 多模分频锁相频率合成技术

- 多模分频器：模值（分频比）可以在多个固定的值上改变的分频器，多模分频器的最高工作频率虽不如固定的前置分频器高，但比可变分频器高得多。



N_1 输出到鉴相器的一个参考周期中，包含的VCO输出信号的周期数N为：

$$N = N_1(V+1) + (N_1 - N_2)V = VN_1 + N_2$$

第42页

- ◆ 在锁相环锁定的情况下，合成器输出频率为：

$$f_o = (VN_1 + N_2) \times f_i$$

此时双模分频器的工作频率为： f_o

分频器 N_1 的工作频率为： f_o / v

分频器 N_2 的工作频率为： $f_o / (v + 1)$

由上式可知，当 N_2 变化1时， f_o 变化为 f_i ，即输出频率分辨率为 f_i 。因此在保持频率分辨率不变的前提下提高了合成器的最大输出频率。

第43页



8.4 直接数字合成技术

8.4.1 直接数字合成基本原理

◆ 1 DDS组成原理

- ◆ 直接数字合成 (Direct Digital Synthesis) 的基本原理是基于取样技术和计算技术，通过数字合成来生成频率和相位对于固定的参考频率可调的信号。

设取样时钟频率为 f_c ，正弦波每一周期由 N 个取样点构成，则该正弦波的频率为：

$$f_o = \frac{1}{NT_c} = \frac{f_c}{N}$$

第44页



- ◆ DDS的实现原理如下图所示



输出信号频率 f_o ：取决于两个因数：(1)参考时钟频率；(2)ROM中存储的正弦波；

第45页

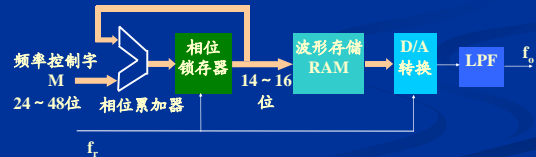


2 相位累加器原理

如果地址计数器以步进 M ($M \geq 1$) 进行累加，则可在 f_c 和ROM数据不变的情况下改变输出频率，此时 f_o 为：

$$f_o = \frac{Mf_c}{N}$$

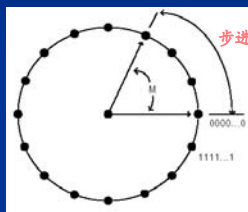
- ◆ 当改变地址计数器计数步进值 (即以值 M 来进行累加)，可以改变每周采样点数，从而实现输出频率的改变。地址计数器步进值改变可以通过相位累加法来实现



第46页



- ◆ 为便于理解，可以将正弦波波形看作一个矢量沿相位圆转动，相位圆对应正弦波一个周期的波形。波形中的每个采样点对应相位圆上的一个相位点。



N	点数
8	256
12	4096
16	65536
20	1048576
24	16777216
32	4294967296
48	281474976710656

第47页



- ◆ 设相位累加器位数为 N ，频率控制字为 M ，参考时钟频率为 f_c ，则DDS输出频率为：

$$f_o = \frac{M}{2^N} f_c$$

实际应用中一般取 $1 < M < (2^{N-2})$

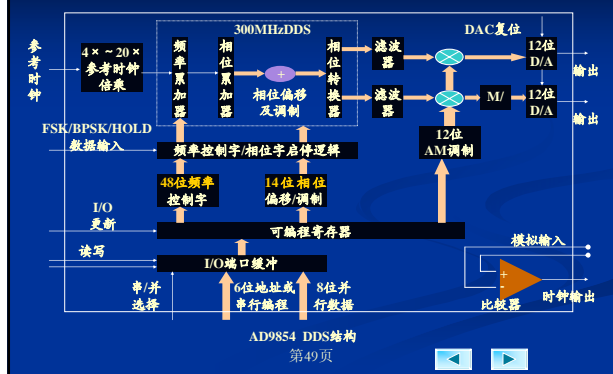
- ◆ 截断误差：一般舍去 N 的低位，只取 N 的高 A 位 (如高16位) 作为存储器地址，使得相位的低位被截断 (即相位截尾)。当相位值变化小于 $1/2^A$ 时，波形幅值并不会发生变化，但输出频率的分辨率并不会降低，由于地址截断而引起的幅值误差，称为截断误差。

第48页



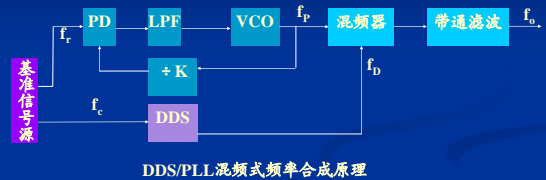
8.4.2 DDS频率合成信号源

◆ 1 单片集成化的DDS信号源



3 DDS/PLL组合的频率合成信号源

- ◆ DDS与PLL组合的合成信号源可以有多种形式，下图是一种环外混频式DDS/PLL频率合成的原理。



此时输出频率为：

$$f_o = f_p \pm f_D = K \cdot f_r \pm \frac{M \cdot f_c}{2^N}$$

DDS频率分辨率高、转换时间短、但上限频率低。
PLL工作频率高、但分辨率低、转换时间长。

第50页

8.5 合成信号源简介

8.5.1 任意波形发生器

- ◆ 任意波发生器 (Arbitrary Wave Generator)：能产生任意波形的信号发生器。

◆ 1 AWG的工作原理

- ◆ 任意波形发生器的原理与DDS基本相同，如下图所示



第51页

2 AWG的主要技术指标

- ◆ ① 波形编辑功能。
- ◆ ② 输出波形频率。
- ◆ ③ 相位分辨率。
- ◆ ④ 幅度分辨率。
- ◆ ⑤ 输出通道数。

第52页

函数、任意波形发生器



第53页

8.5.2 合成扫频信号源

◆ 1 工作原理

- ◆ 频率特性测试的方法：点频法和扫频法

点频法：逐点调整信号发生器的输出频率，并用电压表等设备记录被测系统的响应。

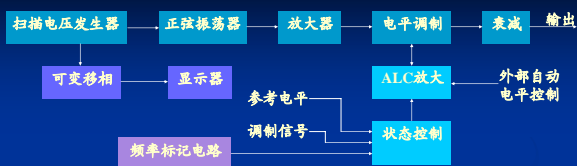
特点：准确度高，但繁琐费时，频率间隔较大。

扫频法：是利用扫频信号发生器输出自动连续变化的频率信号，对被测系统进行动态式的扫频测试。

特点：简单快捷，可以方便地测量系统的频率特性及动态特性。

第54页

扫频信号发生器的原理结构:



扫频信号发生器原理框图

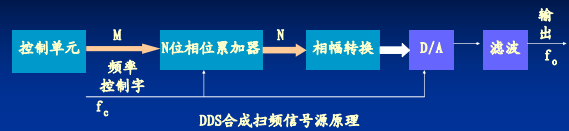
正弦振荡器在扫描电压作用下, 按一定规律在一定频率范围内反复扫描。

扫描电压为锯齿波或三角波: 其频率扫描规律为线性;

扫描电压也可以为对数变化: 频率扫描规律是对数, 对数扫频常用于宽带扫频。

第55页

基于DDS的合成扫频信号源



DDS合成扫频信号源原理

- 输出信号频率为 $(M/2^N)f_c$, 当 M 在 $1 \sim 2^{N-1}$ 之间变化时, 输出频率可在 $(1/2^N)f_c \sim (1/2)f_c$ 范围内变化, 当 M 改变1时, f_o 的变化为 $(1/2^N)f_c$ 。
- 当控制单元输出的频率控制字按一定规律变化时, 则得到按相应规律变化的扫频信号。

由于DDS的输出频率上限较低, 可以采用DDS与PLL组合的方式构成扫频信号源。

第56页

2 合成扫频信号源简介

- 频率合成式的扫频信号源可实现宽带扫频, 它具有频率准确度和分辨力高, 寄生信号和相位噪声低等特点, 具有扫频功能和多种调制方式, 能够取代扫频信号发生器、频率计数器、频率合成器等。合成扫频信号源的生产厂家和种类很多, 其性能特点各不相同。
- 例如Agilent83630B具有连续、步进及斜波等多种工作方式, 频率输出范围为 $0.01 \sim 26.5\text{GHz}$, 单频时的频率分辨力为 $1 \sim 4\text{Hz}$, 扫频时为扫频范围的 0.1% , 其长期稳定度为 $5 \times 10^{-10}/\text{天}$, 输出频率低于 20GHz 时, 谐波噪声低于 -50dBc , 单边带相位噪声小于 -80dBc , 达到了与其它频率合成信号发生器同样的水平。

第57页