

无线通信测量

主 编 王敏建

副主编 何世彪
蒋健敏

东南大学出版社

前 言

无线通信是以空间电磁波为载体传送信息的一种通信方式,构建无线通信时不需要用线缆连接发信端和收信端,因而在航空航天通信、海运渔业和个人移动通信以及军事通信等方面,无线通信是其他通信方式所不可替代的。又由于与别的通信方式相比,无线通信具有通信设备体积小、投资少、操作使用灵活方便等突出的特点,因而无线通信技术及多种多样的无线通信设备在国民经济的各个领域中也得到了日益广泛的应用。与此同时,无线电收发信机的性能检测和维修也逐步发展成为一个重要的行业。无线通信测量就是研究无线电收发信机性能指标及其测量方法的一门学科。

无线电收发信机性能指标较多,往往需要使用很多台单一功能的仪器才能完成一台无线电收发信机的检测工作,配置这样一组仪器往往是很困难的。为了解决这个问题,国内外研制开发了多种无线通信综合测试仪,只用单台仪器就能检测无线电收发信机的所有主要技术指标。由于综合测试仪具有体积小、功能多、便于携带、使用方便等优点而特别受到用户的关注。我国从 20 世纪 60 年代初期就开始生产模拟显示的无线通信综合测试仪,直到 80 年代初期,才有国产数字显示无线通信综合测试仪问世。改革开放以来,与其他事业一样,我国无线通信测试仪器的研制和生产也有了飞速的发展。90 年代初期,由总参第六十三研究所研制的 TX6392 通信综合测试仪投入批量生产。该仪器的综合测试能力和测量精度比过去的同类仪器有很大提高,而且具有许多自动测试功能,目前已成为国内在用的数量最多的一种国产无线通信综合测试仪。

为了规范无线电收发信机的检测方法,普及检测技术和全面地讲述 TX6392 通信综合测试仪的原理,由全军通信测量技术研究中心组织军内外无线通信测量方面的专家和科技工作者编撰了这部专著。本书可作为高等院校相关专业的教材或参考读物,也适合电子测量专业的科技工作者阅读,并可作为 TX6392 通信综合测试仪的操作和维护指导书。

本书分为上下两篇,上篇的第一章主要讲述无线通信测量的基本技术,即信号的产生及频率、功率、电压、调制度、失真度、频谱、波形、误码等基本参数的测量,编撰者是何世彪教授、陈茂贵高级工程师、徐伯勤高级工程师;第二章主要讲述普通无线电收发信机,即调频、调幅和单边带收、发信机的主要电参数的定义、实用测试电路和具体测试方法,由方芳工程师编撰;第三章主要讲述无线通信测量的新发展,其中包括模块化自动测试仪器系统,如 VXI 总线仪器、PXI 总线仪器和虚拟仪器等,还包括随着新的无线通信体制的出现应运而生的抗干扰电台测试、移动电台测试、调制域测试等,本章由鄞广增教授、蒋健敏高级工程师、徐运涛高级工程师编撰,下篇主要讲述 TX6392 通信综合测试仪的总体构成、微处理器控制和测试仪各部分电路原理及使用维修方法等,由王敏建高级工程师编撰。

本书的全部书稿由赖仪一研究员和蒋健敏高级工程师审定。本中心向参加编撰和审定的全体专家和科技工作者表示衷心的感谢,对在本书的编撰和出版过程中予以大力支持的

何继明少将、宋川上校、陆文保高工、陈茂贵总工和安耀瑜厂长等特别致谢。

由于编撰者和审定者的能力有限,书中如有不妥之处望读者见谅并及时向我们指出,以便组织修改。

全军通信测量技术研究中心

2000年10月

目 录

上篇 无线通信测量技术

1 无线通信测量的基本技术	(2)
1.1 信号发生器	(2)
1.2 射频功率测量	(15)
1.3 频率测量	(22)
1.4 调制度测量	(27)
1.5 电压测量	(32)
1.6 失真度测量	(41)
1.7 频谱测量	(47)
1.8 波形测量	(54)
1.9 误码测量	(64)
2 普通无线电收发信机的测试	(71)
2.1 调频发信机的主要技术参数和测试方法	(71)
2.2 调频收信机的主要技术参数和测试方法	(75)
2.3 调幅发信机的主要技术参数和测试方法	(79)
2.4 调幅收信机的主要技术参数和测试方法	(80)
2.5 单边带发信机的主要技术参数和测试方法	(83)
2.6 单边带收信机的主要技术参数和测试方法	(87)
3 无线通信测量的新发展	(93)
3.1 抗干扰电台的主要技术参数和测试方法	(93)
3.2 调制域测试	(100)
3.3 GSM 蜂窝移动电台和系统测试	(107)
3.4 VXI 和 PXI 总线系统测试仪器	(128)
3.5 虚拟仪器	(134)

下篇 TX6392 通信综合测试仪的原理、使用和维修

4 仪器的构成、控制和电源分系统	(139)
4.1 仪器的构成	(139)
4.2 控制器电路原理	(143)
4.3 显示器电路原理	(146)
4.4 键盘电路原理	(150)

4.5	电源电路原理	(152)
5	信号产生器分系统	(155)
5.1	音频信号产生器概述	(155)
5.2	可变频率信号合成器电路原理	(158)
5.3	音频信号和调制信号产生电路原理	(161)
5.4	高频信号产生器概述	(164)
5.5	高射频信号的产生	(166)
5.6	高射频锁相环	(169)
5.7	低射频合成器和输出级	(175)
6	测量分系统	(179)
6.1	概述	(180)
6.2	高频输入通道和高频频率计	(183)
6.3	音频(直流)信号的测量	(187)
6.4	高频信号的测量	(189)
7	使用方法	(195)
7.1	作为通用仪器的使用方法	(195)
7.2	使用注意事项和自检方法	(201)
7.3	测量调频发信机主要指标	(203)
7.4	测量调幅发信机主要指标	(205)
7.5	测量单边带发信机主要指标	(206)
7.6	测量调频收信机主要指标	(208)
7.7	测量调幅收信机主要指标	(210)
7.8	测量单边带收信机主要指标	(213)
8	基本检修方法	(217)
8.1	电源和控制分系统故障的检修方法	(217)
8.2	自检发现故障的检修方法	(219)
8.3	信号源分系统故障的检修方法	(221)
8.4	测量分系统故障的检修方法	(224)
附录 1	TX6392 通信综合测试仪技术条件	(230)
附录 2	TX6392 通信综合测试仪各印制板元件表	(244)
附录 3a	AP7 中各模拟开关状态表	(262)
附录 3b	AP6 中 N7 置数规则表	(263)
附录 4	ASCII(美国标准信息交换码)表	(264)
附录 5	电路图与印制板图集	(另册)

上篇 无线通信测量技术

1 无线通信测量的基本技术

无线通信测量是电子测量领域中重要的、也是最具有活力的一个分支,正是由于无线通信技术的产生、发展,推动了整个电子测量技术的产生和发展。所以无线通信测量所使用的基本技术也就是电子测量中的主要基本技术。它们包括信号的产生及频率、功率、电压、调制制度、失真度、频谱、波形、误码等无线通信中基本参数的测量。在本章中,将系统地讲述这些基本概念、涵盖范围、测量原理、实用测量方法及典型的测量仪器等。

1.1 信号发生器

在对无线电收发信机和其他电子系统、网络及电子元器件的特性进行测量,或者在对电子设备进行维修时,通常都需要用到信号源。信号源是能产生已知特性信号的仪器,它具有广泛的用途。在电子测量中,信号源常常又称作信号发生器。

信号发生器种类繁多,其分类方式有很多种,按用途通常将信号发生器分为专用信号发生器和通用信号发生器。专用信号发生器适用于某些特殊测量要求的场合,通用信号发生器适用于一般场合。按输出波形来分,可将信号发生器分为正弦信号发生器、脉冲信号发生器、函数信号发生器、噪声信号发生器等。按产生方法可分为谐振法、频率变换法和合成法等。对于正弦信号发生器,通常又可按频段进行划分,如:超低频、低频、视频、高频、甚高频、超高频、微波信号发生器等。

1.1.1 信号发生器的主要质量指标

信号发生器质量指标有三大类:频率指标、输出指标和调制指标,这三类指标通常又称为频率特性、输出特性和调制特性。

1.1.1.1 频率特性

表征频率特性主要有如下几项:

- a. 频率范围:各项指标都能得到保证时的输出频率范围,称为信号发生器的频率范围。
- b. 频率准确度:频率准确度通常用信号发生器实际频率与标称频率的相对偏差 α 来表示,其公式如下:

$$\alpha = \frac{f_x - f_0}{f_0} = \frac{\Delta f}{f_0} \quad (1.1)$$

式中:

f_x ——实际输出频率;

f_0 ——标称频率;

Δf ——实际频率对标称频率的绝对偏差。

- c. 频率稳定度:频率稳定度是指在一定时间内,频率准确度的变化,实际上是频率不稳

定度。它主要取决于主振级的频率稳定度。

1.1.1.2 输出特性

通常用以下几项指标表征输出特性：

a. 输出电平范围：指信号发生器输出电平幅度值的范围，单位可用 V(mV、 μ V)或 dBm 来表示。

b. 输出电平稳定度和平坦度：输出电平的稳定度是指输出电平随时间的变化程度，而平坦度则是指在有效频率范围内调节频率时，输出电平随频率的变化(也称之为输出频响)。为了提高输出电平的稳定度和平坦度，现代的信号发生器往往加有自动电平控制电路(ALC)。

c. 输出电平准确度：输出电平实际值与标称值的相对偏差。

d. 输出阻抗：输出阻抗视信号发生器的类型的不同而异。在低频信号发生器中，可能有几种不同的输出阻抗，如 50Ω 、 600Ω 、 5000Ω 等。高频信号发生器常常只有一种输出阻抗，如 50Ω 或 75Ω 。

e. 输出信号的频谱纯度：指输出信号除基波外其他成份所占的份量。频谱不纯主要来自三个方面：高次谐波(即非线性失真)、非谐波和噪声。信号发生器的非线性失真系数一般在 1% 以下。

1.1.1.3 调制特性

带有调制信号输出的信号发生器，通常称之为调制信号发生器，不同的调制类型，有不同的指标要求，如调制频率、调制度、调制线性等，在此不一一介绍。除上面介绍的质量指标外，信号发生器还有其他指标，如：功耗、体积、重量等。

1.1.2 低频信号发生器

低频信号发生器是一种应用广泛的信号发生器，其工作频率范围一般为 $1\text{Hz} \sim 200\text{kHz}$ ，产生低频率信号传统的方法是用文氏桥或差频振荡器，现代技术的发展使直接数字合成信号发生器成为一种很普遍的通用信号源。

1.1.2.1 差频振荡器和文氏桥振荡器

图 1.1 是低频信号发生器的一般方框图。它主要包括：主振器、连续衰减器(电位器 W)、电压放大器、输出衰减器、功率放大器、阻抗变换器(输出变压器)和监测电压表。

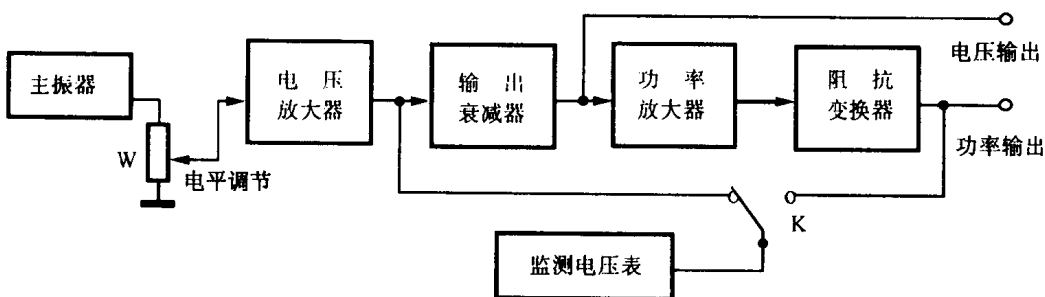


图 1.1 低频信号发生器方框图

主振器产生的低频正弦信号可以经电压放大器直接输出,这个输出信号的负载能力很弱,只能供给电压,故称为电压输出。该信号经功率放大器后,能够输出较大的功率,故称为功率输出。监测器实际上是一个简易的电压表,它通过开关控制是否接入,以监测输出电压或输出功率。连续衰减器 W 用来对输出电平进行连续调节,一般它被置于放大器之前,因此在低输出电平的情况下,信号发生器可以获得很低的非线性失真。

低频信号发生器的主振器常采用差频电路和 RC 正弦振荡电路。用差频电路产生低频正弦信号的方框图如图 1.2 所示。它主要包括:固定高频振荡器、可变高频振荡器、混频器和低通滤波器。设固定高频振荡器的振荡频率为 f_0 ,可变高频振荡器的频率为 $f_{\min} \sim f_{\max}$,当 f_0 大于 f_{\max} 时,混频器输出的差频信号的频率范围为

$$F_{\max} = f_0 - f_{\min} \quad (1.2)$$

$$F_{\min} = f_0 - f_{\max} \quad (1.3)$$

其频率覆盖系数为

$$k = \frac{F_{\max}}{F_{\min}} = (k' - 1) \frac{f_{\min}}{F_{\min}} + 1 \quad (1.4)$$

式中, k' 为可变高频振荡器的频率覆盖系数, $k' = \frac{f_{\max}}{f_{\min}}$ 。

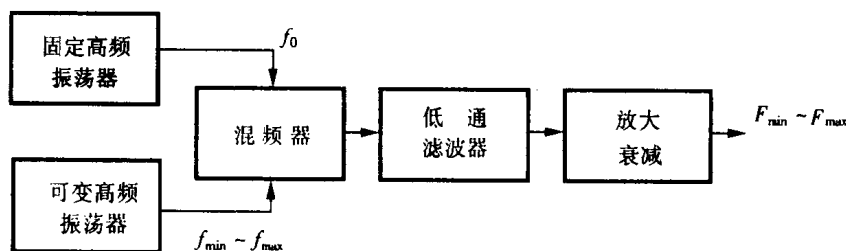
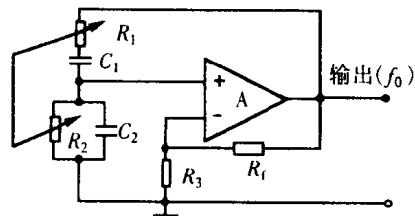


图 1.2 用差频电路产生低频正弦信号

频率覆盖范围宽,无需转换波段就可覆盖整个音频频段,这是差频法的主要优点。其主要缺点是:频率稳定性和输出频谱纯度不易做高。

除差频振荡器外,低频信号发生器的主振器也可采用 RC 正弦振荡器,尤以文氏电桥振荡器为最普遍。图 1.3 是文氏电桥振荡器的电路原理图。图中, A 为放大器增益。



(1.5) 图 1.3 文氏电桥振荡器原理电路

该电路的振荡频率为

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}}$$

在通常情况下,选择 $R_1 = R_2 = R, C_1 = C_2 = C$ 。由式(1.5)可见,调节 R 或 C 的大小可以改变输出信号的频率。 R 一般用于细调频率, C 用于粗调频率范围。 R_f 选用热敏电阻,用以稳定振幅,并使放大器工作在线性区域,从而改善非线性失真。输出信号的幅度由输出衰减器控制。

1.1.2.2 直接数字频率合成法

直接数字频率合成(DDS)是一种新型的频率合成方法。其基本原理是根据不同的相位给出不同的电压幅度,即在信号的一个周期中(相应的相位为 2π),给出相位和电压幅度变

化规律组成输出波形。由于它不但给出了不同频率和不同相位,而且可以给出不同的波形,因此这种方法又称波形合成法。

DDS 的基本原理也就是波形合成原理。最基本的波形合成是锯齿波的合成,其方案如图 1.4 所示。波形合成的过程如下:由一个标准频率的时钟产生器产生时钟脉冲,送到计数器进行计数。计数器根据计数脉冲的多少给出不同的数码。数模转换器根据计数器输出的数码再转换成相应的电压幅度。当计数器连续计数时,数模转换器就产生一个上升的阶梯波,阶梯波的上升包络为一斜升波。当计数器计满时,计数器复零又重新开始计数,阶梯波又从零开始,如此反复循环。阶梯波经平滑滤波器检出其包络,便成为锯齿波。

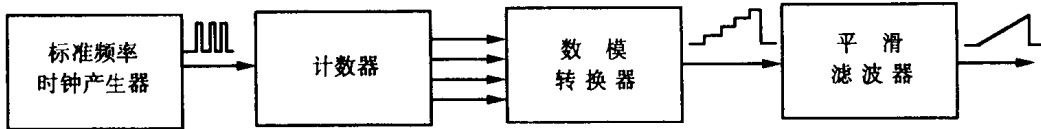


图 1.4 锯齿波合成的方框图

改变频率的方法是用一个累加器代替计数器,这就像数字环中用可变分频器代替固定分频比的计数器一样。采用累加器后,可通过改变累加器输出状态增量,来改变频率控制数据,以得到不同频率的锯齿波输出。

采用计数器或累加器的级数愈多,得出的阶梯波愈接近锯齿波,控制锯齿波的精度也就会愈高。数模转换器的分辨率与计数器或累加器位数 n 的关系为

$$\text{分辨率} = \frac{1}{2^n} \%$$

锯齿波的频率决定于频率控制数据,频率控制数据越大,锯齿波频率就越高,但数模转换器的分辨率越差。累加器的位数与数模转换器的位数相等。设累加器的位数为 n ,频率控制数据为 $k(k=1,2,3,\dots)$,那么所形成的阶梯数为 $2^n/k$ 。一个周期内阶梯数越多,越接近锯齿波,非线性失真越小,因此除要求累加器和数模转换器位数高以外,对于频率控制数据则应要求不能太大,一般应保证一个周期内至少有四个阶梯,所以最大的频率控制数据为 $k_{\max} = 2^{n-2}$ 。

锯齿波的幅度变化与其相位变化成正比,故可以把相位数码直接转换成幅度数码,但是对于任意波形来说,相位和幅度的关系一般不是正比关系。如果要合成任意波形,就应找出波形幅度和相位的关系,然后用一个相码/幅码转换器将相码转换成相应合成波形的幅码,再用数模转换器转换成接近所需波形的阶梯波形,通过平滑滤波器滤除时钟及其谐波,得到所需要的合成波形。任意波形合成的方框图如图 1.5 所示。

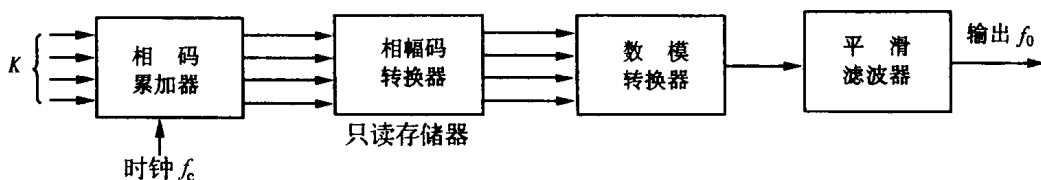


图 1.5 任意波形合成的方框图(DOS 方框图)

DDS 进行频率合成的过程归纳如下:

a. 给定输出频率范围,即

$$f_0 = f_{0\min} \sim f_{0\max} = \frac{k_{\min}}{2^n} f_C \sim \frac{k_{\max}}{2^n} f_C$$

b. 确定输入时钟频率 $f_C = 4f_{0\max}$, 即时钟周期为 $T_C = 1/f_C = 1/4f_{0\max}$ 。因为 $k_{\max} = 2^{n-2}$ 。

c. 确定累加器位数 n , n 越大, 输出信噪比越高。

d. 确定幅度等分的间隔数 $B = 2^m$ 。一般来说 $m < n$, 若 $2^n = A$, 则 $B < A$ 。

e. 把 A 个相位点对应的幅度编码存入只读存储器(ROM)中。

f. 按时间顺序(即相位顺序), 在每个时钟周期 T_C 内取出一个相位编码, 并由相码转换成它相应的幅码。取出相码的增量通过累加器用频率控制数据 k 来确定。

g. 输出幅码通过数模转换器变为对应的阶梯波。这个阶梯波的包络恰好是对应所需合成信号的波形。

h. 经过平滑滤波器输出连续变化的所需合成信号的波形。滤波器截止频率应为

$$f_{0\max} = \frac{1}{4} f_C$$

值得注意的是, 在图 1.5 中, 若输出波形为一个具有正负极性的波形, 如正弦波, 则应考虑正负半周的幅度编码问题。为此, 在 ROM 前或后要加所谓求补器(因为最高位是符号位, 如正半周时最高位为 1, 负半周时为 0)。

由前面的分析已知, DDS 的合成信号频率为 $f_0 = k \cdot \left(\frac{f_C}{2^n}\right)$, 显然改变频率控制数据 k 便可以改变合成信号频率 f_0 , 这一点类似于数字环中通过改变可变分频器分频比来改变环路输出频率。

由于微电子技术的飞速发展, 现在已有多种超大规模 DDS 芯片问世, 它不但将图 1.5 中电路, 而且将 D/A 也集成在其中, 使用非常方便。此外由于有些芯片的时钟已高达数百 MHz, 因此 DDS 不但可用来产生低频信号, 更多是用于产生高频信号。DDS 的主要优点是:

a. 高速的频率转换能力, 能达到几十 ns 数量级。

b. 高度的频率分辨率, 即频率间隔很小。如当 $f_C = 50\text{MHz}$, $n = 32$ 时, DDS 的分辨率为 $f_C/2^n = 11.6\text{nHz}$ 。

c. 能够合成多种波形。

d. 具有数字调制能力。

e. 集成度高, 因而体积小, 重量轻。

DDS 的主要缺点是:

输出信号频谱成分复杂, 在时钟频率低时主要由相位量化和幅度量化所引起。在时钟频率高时主要由 DAC 的非线性特性所决定。

1.1.2.3 DF1028 型低频信号发生器简介

DF1028 型低频信号发生器是一种能产生 1Hz ~ 1MHz 频率的低失真正弦波信号发生器, 其电路特点较多。最大输出电压 10V, 且设有总衰减量为 80dB 的衰减器和大于 20dB 的连续幅度调节。图 1.6 为其电路框图。从图中可以看出, DF1028 型低频信号发生器由下面几个部分组成:

a. 主振荡器, 包括 RC 串并网络(即文氏桥电路)、放大器及幅度控制电路;

b. 功率放大器;

- c. 输出衰减器;
- d. 电表指示电路;
- e. 直流稳压电源等。

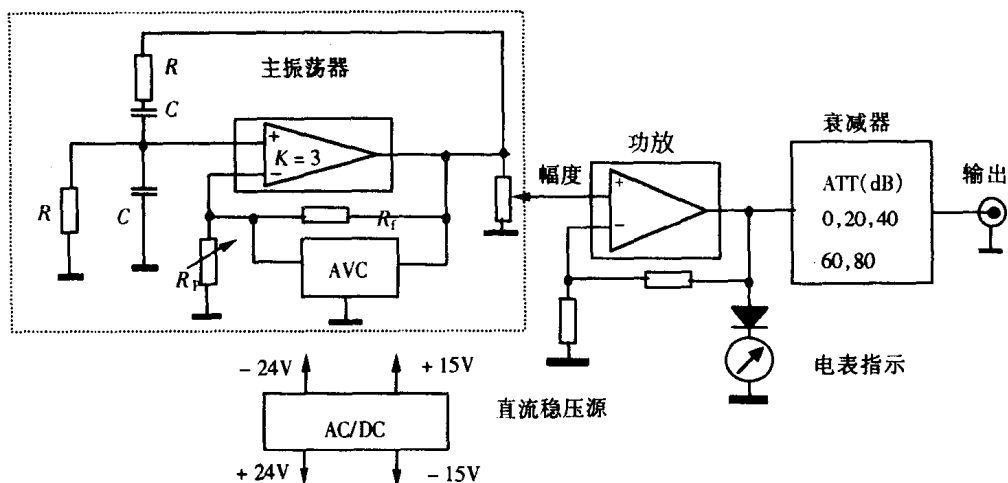


图 1.6 DF1028 型信号发生器方框图

从图 1.6DF1028 型低频信号发生器电路框图中可以看出,其主振荡器采用典型文氏桥电路, $R-C$ 串并联组成选频网络。根据式(1.5),振荡频率 $f = \frac{1}{2\pi RC}$ 。本仪器采用改变电容 C ,作为频率“倍乘”;改变电阻 R ,作为频率“细调”,这是因为电阻比电容在数值上有更多的选择余地和更高精度,使频率调节方便。

图 1.6 中放大器有负反馈电路 R_f 与 R_p , R_f 平时与幅度控制电路(AVC)的输入电阻并接,因此放大器的放大倍数由 AVC 进行自动控制。AVC 的设计较新颖,调节平稳,有噪声干扰小的优点,是 DF1028 型信号发生器的一个突出之处。

放大器采用分立元件设计,共有三级。第一级为控制零漂和提高输入阻抗,采用场效应管差分输入;第二级采用 PNP 管,差分输入,单端输出;第三级由射极跟随器构成,以减低输出阻抗、增强整个放大器的负载能力。

主振荡器中的幅度控制电路(见图 1.7)通过基准电压比较器,用加法器抵消控制电压纹波,将场效应管作可变电阻来变动负反馈,从而改变放大器的增益,保证场效应管工作在线性区域,由此形成的自动控制使引入的失真减少到最低程度。从图 1.7 可见,它是由输入场效应管 T_{13} 、加法器、积分器、比较器以及 AC/DC 转换器等组成。其主要作用是使振荡电路起振后 $K=3$,保证振荡器工作稳定,处在放大器线性区域。实际上它起了一个模拟可变输入电阻的作用,其阻值随输入信号幅度增大而增大。最后由场效应管 T_{13} 来实现幅度控制。其工作过程如下:

振荡输出幅度 $\uparrow \rightarrow$ OP1“5” $\downarrow \rightarrow$ OP1“7” $\downarrow \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \text{OP3“12”} \uparrow \\ \text{OP2“8”} \downarrow \end{array} \right\} \rightarrow$ OP3“14” $\downarrow \rightarrow T_{13}$ 沟道电阻阻值 $\uparrow \rightarrow$ 负反馈量 $\uparrow \rightarrow$ 增益 $\downarrow \rightarrow$ 振荡幅度 \downarrow 。

反之,当振荡器输出幅度减小时,按相反情况进行控制,只不过当幅度小时,OP1“5”是 +15V,通过 R_{35} 和 AC/DC 变换输出相加。当输出幅度为 0 时,OP1“5”趋于 +15V,即为停振

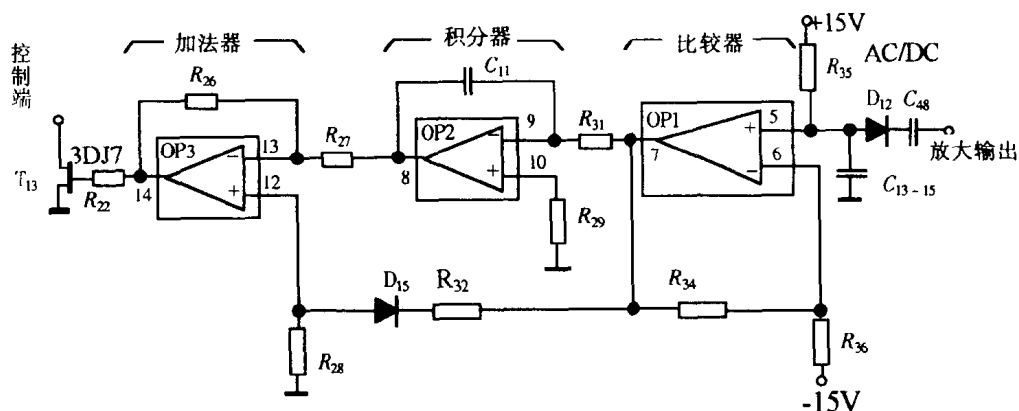


图 1.7 幅度控制电路(AVC)原理图

状态,修理故障时可作参考。

AC/DC 变换电路是一个简单的整流电路。经 C_{48} , 由 D_{12} 管整流, C_{13-15} 滤波, 将正弦波电压变换成正比的直流电压。

比较电路由运放 OP1 构成。基准电压 ($-15V$) 加在反相输入端。当振荡器超过一定幅度时, 即 OP1 “5” 端电压超过一定值, OP1 “7” 端输出正电压; 反之, 输出负电压。正常稳态工作时, 输出处于一定的负电位。

另一运放 OP2 构成积分器, 输入同输出电压反相。一方面提高滤波效率, 另一方面将残余噪声和纹波反相地送到加法器作抵消用。

控制电路末级是加法器输出, 积分器的噪声 (反相) 和比较器噪声 (同相) 相抵消, 保证了控制电压是稳定的直流电压, 以减少控制回路引入的非线性失真, T_{13} 场效应管的沟道与反馈电阻 R_p (图 1.6) 并联, 作为可变沟道电阻, 由此改变反馈量和放大器的增益, 达到自动幅度控制 (AVC) 的目的。

此外, 为了保证输出足够功率, 振荡信号还需经过功率放大器输出。功率的放大倍数为 3 倍左右, 频率上限达 $1.5MHz$, 最大输出电压 $35V_{p-p}$, 通过深度负反馈, 引入的失真不超过 0.04% 。

功率放大器由差分输入级、电压放大级和互补输出级几部分组成。

其电表电路是一个高频二极管整流电路, 直流电压直接加在高灵敏电表上, 指示输出信号电压的有效值。

1.1.3 高频信号发生器

高频信号发生器用来向各种电子设备和电路提供高频标准信号, 以便测试各种电子设备和电路的电气工作特性。测试各类无线电收音机的工作特性, 是高频信号发生器最重要的用途之一。从产生方法上分, 高频信号发生器主要有谐振法和合成法两类。对谐振法我们只作简单介绍, 而重点介绍合成信号发生器。

谐振法高频信号发生器的主振级用具有正反馈的谐振电路产生一定频率范围的正弦信号。这是一种原始的方法, 由于其频率稳定度差, 所以在电子技术飞速发展的今天, 已被各种合成高频信号发生器所取代。

利用频率合成技术产生输出信号的信号源,称为合成信号发生器,它具有较高的频率稳定性和准确度,有宽而准确的输出电平调节范围,有很宽的工作频率范围和有较小的频率间隔等特点。

频率合成的具体方法很多,但基本上可以归纳为三大类:直接模拟合成法、间接合成法和直接数字合成法。第一类直接利用混频、倍频和分频进行频率的算术运算;第二类是通过锁相环进行频率的算术运算;第三类是在基准频率(时钟)的触发下,利用数字、取样技术进行频率合成。

直接模拟合成法又称为纯合成法,是最早被采用的频率合成方法。在直接模拟式频率合成器中,一般由高稳定晶振产生参考频率。参考频率信号通过脉冲形成电路来产生谐波丰富的窄脉冲,随后通过混频、分频、倍频、滤波等步骤,进行频率变换和组合,以产生所需要的大量离散频率。图 1.8 所示为某直接模拟式频率合成器的原理方框图。若要从 5MHz 的晶体振荡器中获得频率为 21.6MHz 的信号,可以先将 5MHz 信号经 5 分频后,得到频率为 1MHz 的参考信号。然后将 1MHz 信号输入谐波发生器中产生各次谐波。从谐波发生器中选出 6MHz 信号,经分频器除 10 变成 0.6MHz 信号。从谐波发生器中再选出 1MHz 信号,使它与 0.6MHz 信号同时送入混频器进行混频,得到 1.6MHz、0.4MHz 信号。经滤波器选出 1.6MHz 信号并除以 10 后,得到 0.16MHz 信号,再将它与从谐波发生器选出的 2MHz 信号进行混频,得到 2.16MHz、1.84MHz 信号。经滤波器选出 2.16MHz 信号再经过 10 次倍频后,得到所需的 21.6MHz 信号。

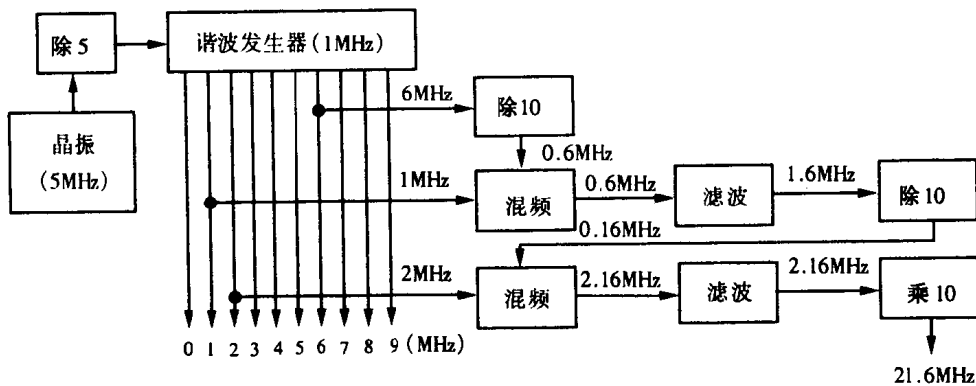


图 1.8 某直接模拟式频率合成器的原理方框图

这种直接模拟式频率合成器的成本高、体积大,而且输出谐波、噪声及寄生调制都难以抑制。因此,除了固定频率的合成之外,直接模拟合成法已很少被采用。

现在大多采用间接合成法,亦称锁相合成法,它是通过锁相环来完成频率的算术运算的。由于锁相环具有滤波作用,因此可以省去直接模拟合成法中需用的大量滤波器,简化结构、降低成本、便于集成。

基本锁相环是由鉴相器(PD)、环路低通滤波器(LPF)及压控振荡器(VCO)组成的,如图 1.9 所示。鉴相器是相位比较装置,它将输入基准频率信号 $V_i(t)$ 和输出信号 $V_o(t)$ 的相位进行比较,其输出是与两信号的相位差成比例的误差电压 $V_\phi(t)$ 。环路滤波器滤除误差电压 $V_\phi(t)$ 中的高频分量和噪声,以保证环路所要求的性能,并提高系统的稳定性。压控振荡器受滤波器输出电压 $V_f(t)$ 的控制,使其振荡频率向输入基准频率靠近,直至锁定。环路锁定后,VCO 的振荡频率等于基准频率;VCO 输出信号的相位与输入信号的相位相同或相差

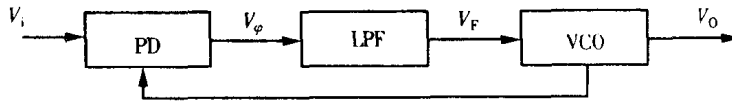


图 1.9 基本锁相环的方框图

某一常数,鉴相器的输出电压是一个直流电压。

只要在鉴相器的任何一个输入端插入适当电路,就可以构成对基准频率进行各种运算的锁相环合成器,以下分别加以介绍。

1.1.3.1 倍频式锁相环合成器

利用锁相环可以对输入信号频率进行乘法运算,这种锁相环称为倍频式锁相环。图 1.10 给出了两种常用的倍频式锁相环。

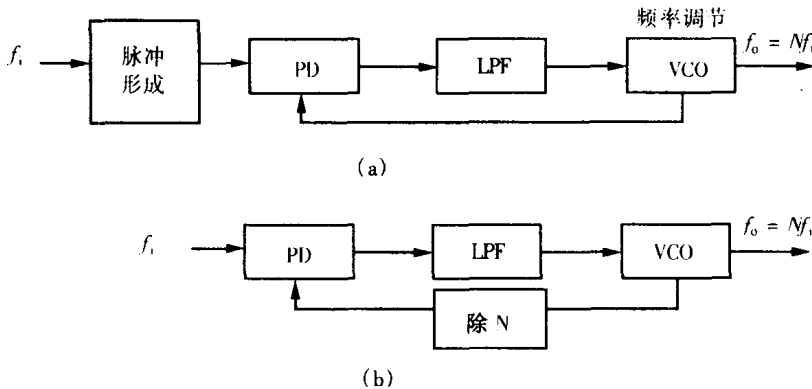


图 1.10 倍频式锁相环

(a) 脉冲控制环;(b) 数字环

图 1.10(a)所示的是脉冲控制环(IGO 环)倍频器,其工作原理为:先把输入基准频率信号形成含有丰富谐波分量的窄脉冲,然后让其中的第 N 次谐波与 VCO 信号在 PD 中进行相位比较。当环路锁定时,VCO 振荡频率与输入信号的第 N 次谐波频率相等,从而达到倍频的目的。为了使 VCO 信号只与输入信号的第 N 次谐波比较,VCO 的自由振荡频率应预先调节在 Nf_i 附近。改变 VCO 的自由振荡频率,则可以改变倍频系数 N 。

图 1.10(b)所示的是数字环倍频器,它是在基本锁相环的反馈支路中加入数字分频器而实现的。此时,在鉴相器中进行比较的两个信号频率是 f_i 和 f_o/N ,因此当锁相环锁定时,有 $f_i = f_o/N$,即 $f_o = Nf_i$ 。显然分频器的分频系数 N ,即是数字环的倍频系数,因此数字环的倍频系数可以做得很大。基于这个原理,间接合成法有可能采用简单的分频-倍频链来实现频率合成。

1.1.3.2 分频式锁相环合成器

利用锁相环可以对输入频率进行除法运算,这种锁相环称为分频式锁相环。在图 1.11 中画出了两种最简单的分频环,它们是由倍频环演变而来的。分频环主要用于频率很高,以致很难采用数字分频器的情况。例如,为了把原子标准频率降低到精密的晶体振荡频率,就要用到分频环。此外,分频环也可用作十进制合成单元中的除 10 分频器。

1.1.3.3 混频式锁相环合成器

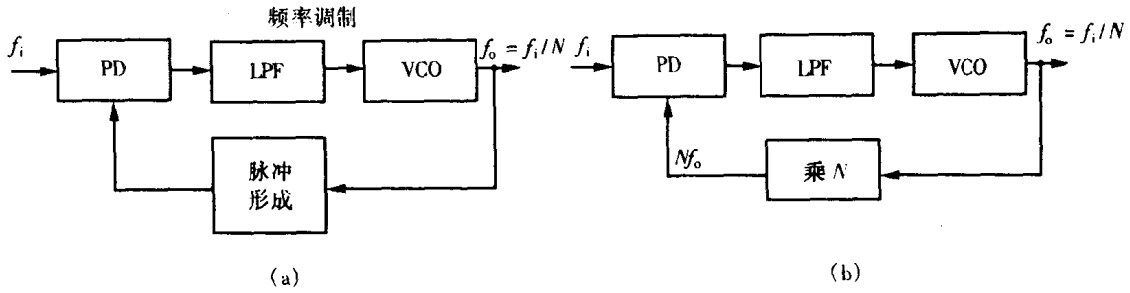


图 1.11 分频式锁相环

利用锁相环可以对输入频率进行加、减运算,这种锁相环称为混频式锁相环。在图 1.12 中画出了一种最简单的混频环,它是在基本锁相环的反馈支路中加入混频器和带通滤波器而构成的。由图可见,如果混频器是和频式的,那么输出频率 $f_o = f_{i1} - f_{i2}$,是两输入频率之差;反之,如果混频器是差频式的,那么输出频率 $f_o = f_{i1} + f_{i2}$,是两输入频率之和。

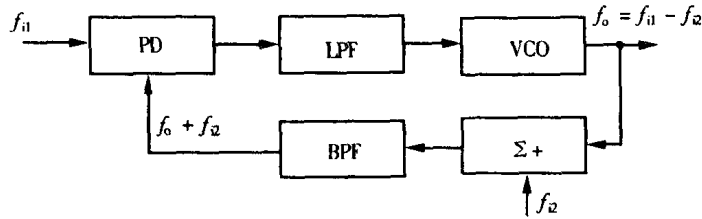


图 1.12 混频式锁相环

随着数字集成技术的迅速发展,分频系数可在很宽范围内调节的数字程序分频器得到了广泛的应用。将程序分频器用于数字环,就可以得到一个单环频率合成器,它的输出频率范围为 $f_o = N_{\min}f_i \sim N_{\max}f_i$ 。在实际运用中,通常要对单环频率合成器的输出频率的下限和上限频率进行扩展,利用倍频-混频组合环可扩展下限频率,利用脉冲吞吐分频器或固定预分频可扩展上限频率。

1.1.3.4 基于 DDS 的频率合成器

以 DDS 为核心的高频信号产生器主要采用混合体系,通常有三种结构:DDS + DS、DDS + PLL 和 DDS + PLL + DS。

图 1.13 是频率合成器的一个实例。它采用 DDS + PLL 结构,要求输出频率范围为 700 ~ 900MHz,频率转换时间小于 $5\mu s$,频率分辨率 $\leq 1\text{Hz}$,杂波电平 $\leq -50\text{dB}$,相位噪声小于

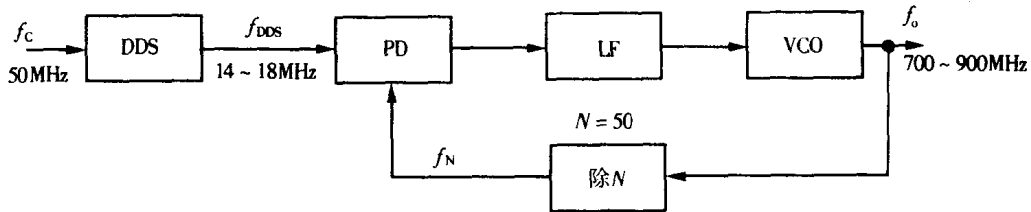


图 1.13 频率合成器实例

-100dB/Hz(偏离主信号1kHz处)。一种高性能的 DDS 芯片时钟为 50MHz,数据位数 $n = 32$,12 位幅度码输出,经 DAC 和滤波,输出在 14 ~ 18MHz,杂散在 -84dB,经 50 倍频达到所需输

出频段,最终分辨率为 0.58Hz,满足要求。杂散经 50 倍频增加了 $20\lg 50 = 34\text{dB}$,刚好满足 $\leq -50\text{dB}$ 的要求。同样,相位噪声也能满足要求,图中:

$$f_o = Nf_{\text{DDS}} = 50 \cdot \frac{k}{2^n} \cdot f_c$$

式中, k 是送入 DDS 的数据。

一种 DDS + PLL + DS 结构的原理图示于图 1.14,满足 $f_R \leq \text{BW}_{\text{DDS}}$ (DDS 的输出频带)。混频滤波电路(DS)由相乘器和带通滤波器(BPF)组成,其输出频率取两输入频率的和频。因为 $f_{\text{DDS}} = k \cdot \frac{f_c}{2^n}$,PLL 输出频率为 Nf_R ,故

$$f_o = Nf_R + f_{\text{DDS}} = Nf_R + k \cdot \frac{f_c}{2^n}$$

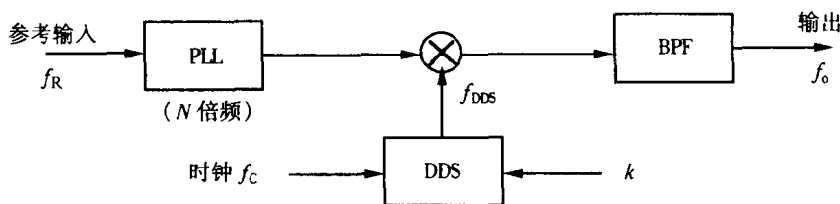


图 1.14 一种 DDS + PLL + DS 结构的方框图

该系统的特点是:通过改变 PLL 中的可变分频器分频比 N 粗调到某一输出频段,再通过改变 DDS 的频率控制数据 k 细调到某一输出频率。由于 DDS 保证了高的频率分辨率,从而提高鉴相频率,缩短 PLL 的频率转换时间(因 PLL 的频率转换时间受频率分辨率限制)。在频率粗调范围内,频率细调时间完全由 DDS 确定。要求 $f_R \leq \text{B}_{\text{DDS}}$ 是为了避免在输出频率范围内出现空白点。

1.1.4 函数信号发生器

函数信号发生器实际上是一种多波形信号源,可以输出正弦波、方波、锯齿波、半波正弦波及指数波等。函数发生器中引入微机后,可以产生的波形种类就更多了。由于其输出波形均可用数学函数描述,故得名函数发生器。目前函数发生器输出信号的重复频率可达 50MHz,而低端可至 μHz 量级。

函数信号发生器以某种波形为第一波形,然后利用第一波形导出其他波形。构成函数发生器的方案很多,早期是先产生方波,经积分作用产生三角波或锯齿波,再由三角波经过非线性函数变换网络形成正弦波;后来又出现了先产生正弦波,再形成方波、三角波等等。近来较为流行的方案是先产生三角波,然后产生方波、正弦波等,还可以借助计算机技术直接产生各种函数波形。

1.1.4.1 函数信号发生器的典型电路

三角波产生电路如图 1.15 所示:

假设开始工作时开关 S_1 接通,电流源 I_1 向积分电容 C 充电,形成三角波的斜升过程,当 V_o 上升到幅度控制电路的限值电平 $+E$ 时,该电路将发出控制信号,使开关 S_1 断开、 S_2 接通。由于 S_1 断开,三角波的斜升过程就此结束。

电流源 I_2 向电容 C 充电,且充电方向与第一步时相反,形成三角波的斜降过程。当下