

# 直接数字频率合成器(DDS)及其性能分析

高泽溪 高成  
(北京航空航天大学 工程系统工程系)

**摘要** 介绍了直接数字频率合成器 DDS (Direct Digital Synthesizer) 的组成、工作原理及性能; 运用信号系统理论和方法详细分析了 DDS 的相位噪声、杂散噪声、数字化截断误差对输出波形的影响以及 DAC 非线性对频谱纯度的影响等; 还给出了相应的分析计算公式和响应曲线; 得出的结论对提高 DDS 输出信号的质量有一定意义。

**关键词** 频率合成器; 频谱; 分辨率; 相位噪声  
**分类号** TN 911. 8

在现代战争中, 电子系统的应用极为广泛, 有人称现代化战争为电子战. 频率合成技术是电子系统中非常关键的技术, 在雷达、通信、武器制导、电子对抗等方面, 它们要求在一个很宽的频率范围内以快捷的速度, 提供大量高精度、高稳定度的频率信号. 虽然锁相频率合成技术发展非常快, 应用也很广泛, 但是频率转换速度不快, 电路和微机控制复杂. 新出现的 DDS 及其与锁相技术组合技术将成为频率合成技术的新潮流. 所以目前国外非常重视频率合成技术的研究. 高分辨率, 宽工作频段, 低相位噪声, 高捷变速率的频率合成器的系列产品不断涌现. 直接频率合成(DDS)是近年来出现的一种频率合成器的新方法. 由于应用全数字的大规模集成技术, 具有体积小、价格低、频率分辨率高、快速换频, 易于智能控制等突出特点, 近年来 DDS 发展迅速, 倍受青睐. 本文就正弦输出的 DDS 的工作特点和技术性能进行分析.

## 1 DDS 组成及其特点

直接数字频率合成器 DDS 的组成见图 1.

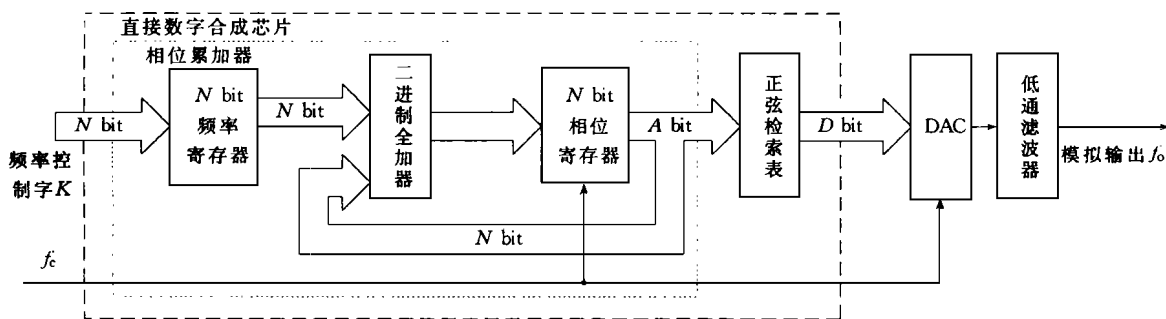


图 1 DDS 原理简图

收稿日期: 1997-04-03 第一作者 男 57岁 教授 100083 北京

它由相位累加器、只读存储器(ROM)、数模转换器(DAC)及低通平滑滤波器(LPF)构成. 在时钟脉冲的控制下, 频率控制字  $K$  由累加器累加得到相应的相码, 相码寻址 ROM 进行相码-幅码变换输出不同的幅度编码, 再经过数模变换器得到相应的阶梯波, 最后经低通滤波器对阶梯波进行平滑, 即得到由频率控制字  $K$  决定的连续变化的输出波形.

基于 DDS 的组成和工作原理, 可以看出它具有下列若干特点:

1) DDS 的频率控制字  $K$  由  $N$  位的二进制数组成, 即使用  $N$  位二进制累加器, 故频率分辨率等于最低输出频率  $f_c/2^N$ , 只要  $N$  足够大, 即累加器的位数具有足够长度, 总能得到所需的频率分辨率. 输出频率由频率控制字决定:

$$f_o = K \cdot \frac{f_c}{2^N}$$

根据采样定理, DDS 的最高输出频率应小于  $f_c/2$ , 实际应用中一般只能达到  $40\%f_c$ .

2) DDS 具有超宽的相位频率带宽(由  $f_c/2^N$

至 40%  $f_c$ ), 超高的频率转换速度 ( $\mu s$  至 ns 量级), 超高的频率分辨率, 以及频率转换时相位保持连续, 可以输出宽带的正交信号, 易单片集成, 易实现 FSK、PSK 数字调制, 可以产生一般频率合成器难以产生的波形, 易于微处理器控制, 体积小、功耗低的特点, 因此它得到了广泛应用。

3) 影响 DDS 主要技术性能的因素: 由于 DDS 的工作原理是基于数字取样及数模恢复的处理, 所以上述主要性能受到其工作原理的限制: 其一, 根据取样定理, 输出信号基波的最高频率将低于参考时钟的一半, 故若要提高输出频率将受到器件(如 DAC、ROM)的速度限制。目前输出频率达到 450 MHz 的 DDS 系统已研制成功。随着电子器件工作速度的提高, DDS 的输出频率上限也将可以提高。其二, DDS 输出的模拟信号中杂散寄生分量较大, 其中输出高频尤甚, 它无法达到 PLL 频率合成的频谱纯度。其三, DDS 的功耗与其时钟频率成正比, 故在供电受到限制的场合且又要求有较高的频率输出, DDS 就有局限性。

## 2 DDS 的噪声分析

频率合成器的主要技术指标包括: 频率范围、频率分辨率、频率转换时间、相位/频率稳定度、频谱纯度(包括相位噪声、谐波和杂散噪声)等。

我们所设计的 DDS-01A 高分辨率频率合成器(频率范围 0.1 Hz ~ 15 MHz, 频率分辨率 0.1 Hz, 转换速率小于  $2 \mu s$ , 输出谱纯度优于 50 dB)是用 DDS 集成芯片实现的。DDS 的噪声直接影响整个频率合成系统的特性, 故对 DDS 输出的噪声分析是必要的。下面主要讨论正弦输出的 DDS 的相位噪声和杂散噪声。

### 1) 相位噪声

由 DDS 原理可知, 它本身实际是一个分频系统, 故可以表示为

$$f_o = K \cdot f_c / 2^N = f_c / M$$

其中  $N$  为相位累加器的位数;  $K$  为频率控制字; 其等效的分频系数  $M = 2^N / K$ 。

由分频器的相位噪声性能可知: 分频输出的相位噪声将比其输入信号低  $20 \log M$  dB, 因此理论上 DDS 的相位噪声应比钟源的相位噪声改善  $20 \log(2^N / K)$  dB, 但由于 DDS 输出信号的相位噪声除了取决于钟源的相位噪声外, 还和其它因素(如数字电路的触发噪声)有关, 所以实际上达不到理论值。

### 2) 杂散噪声

DDS 系统输出信号中杂散噪声较多, 这是它的不足之处。通过对杂散噪声的分析、研究, 在它的设计过程中可使杂散噪声达到最小程度。图 2 是 DDS 输出的理想频谱。它是在以下 3 个假设条件下得到的: ①相码-幅码变换时没有相位舍位; ②没有幅度量化误差; ③DAC 具有理想的转换特性。这样理想的 DDS 输出的样本序列为

$$S(n) = \cos \left[ K \cdot \frac{2\pi}{2^N} \cdot n \right] \quad n = 1, 2, \dots \quad (1)$$

$S(n)$  通过 DAC 和低通滤波器, 得到 DDS 的输出  $S(t)$ , 显然  $S(t)$  是连续时间的周期信号。对它进行傅氏变换, 得到理想 DDS 输出的频谱表达式:

$$S(\omega) = \pi \sum_{l=-\infty}^{\infty} Sa \left[ \pi \frac{l f_c - f_o}{f_c} \right] \exp \left[ -j\pi \frac{l f_c - f_o}{f_c} \right] \delta(\omega - 2\pi(l f_c - f_o)) + \pi \sum_{l=-\infty}^{\infty} Sa \left[ \pi \frac{l f_c + f_o}{f_c} \right] \exp \left[ -j\pi \frac{l f_c + f_o}{f_c} \right] \delta(\omega - 2\pi(l f_c + f_o)) \quad (2)$$

其中  $Sa(x) = \frac{\sin x}{x}$

图 2 就是根据式(2)作出的理想 DDS 输出频谱。

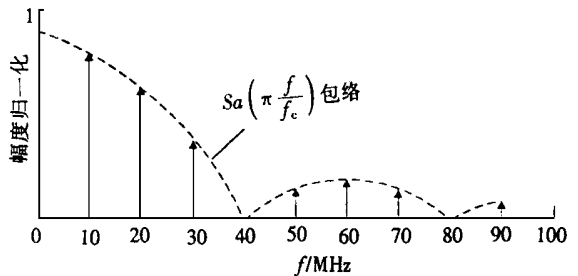


图 2 理想 DDS 的输出频谱

式(2)表明: 理想 DDS 的输出信号只在  $f = l f_c \pm f_o$  处存在杂散分量。

实际上 DDS 系统并不满足前面 3 个条件, 因此实际 DDS 的输出将产生较高的杂散分量。

### 3) 相位舍位产生的相位误差信号 $\epsilon_p(t)$

实际的 DDS 系统, 一般只取相位累加器输出的高  $A$  位来寻址 ROM, 而舍去  $B$  位 ( $B + A = N$ ), 这就引入了相位舍位误差。舍位后的累加器输出的相位序列为

$$\Phi_r(n) = nK \bmod 2^N - nK \bmod 2^B \quad (3)$$

此处 mod 表示模除运算。对任意两个整数  $p, q$ ,

mod 运算定义为

$$p \bmod q = p - \text{int}(p/q)q$$

其中  $\text{int}(\cdot)$  代表取整运算。

理想 DDS 输出的相位序列为

$$\Phi(n) = nK \bmod 2^N \quad (4)$$

根据式(3)和式(4)得到相位舍位所产生的相位误差序列为

$$\epsilon_p(n) = \Phi(n) - \Phi_r(n) = nK \bmod 2^B \quad (5)$$

当  $K = m \cdot 2^B$  ( $m = 1, 2, \dots$ ) 时, 有  $\epsilon_p = 0$ 。由模除运算性质可知  $\epsilon_p(n)$  是一个严格的周期序列, 相位误差信号  $\epsilon_p(t)$  ( $\epsilon_p(n)$  的连续时间表示) 是周期的阶梯波, 对  $\epsilon_p(t)$  作傅氏变换, 得到相位误差信号的频谱函数:

$$\begin{aligned} \text{转换)} = \text{相位} &= \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2^B}{n} \left\{ Sa \left[ \frac{mf_c - nf_p}{f_c} \pi \right] \right. \\ &\left. \delta \left[ \omega - \frac{1}{D} 2\pi (nf_p - mf_c) \right] - Sa \left[ \frac{mf_c + nf_p}{f_c} \pi \right] \right. \\ &\left. \delta \left[ \omega - 2\pi (nf_p + mf_c) \right] \right\} \quad (6) \end{aligned}$$

其中  $f_p = \frac{a}{\lambda} f_c$

上式表明:  $\epsilon_p(t)$  由频率为  $f = mf_c \pm nf_p$  ( $m, n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ ) 的分量组成, 由于随着频率  $f$  的增加, 对应的幅度按  $Sa(f_x/f_c)$  规律衰减 ( $f_x = mf_c \pm nf_p$ ), 因而可以只考虑  $\epsilon_p(t)$  在  $(0, f_c/2)$  内的频率分量。

4) 相位舍位条件下对 DDS 输出波形影响

DDS 中存在的相位舍位, 其效果等于在理想参数 DDS 输出信号引入了相位调制, 调制周期为  $\lambda T_c$ 。这时 DDS 的输出波形序列:

$$\begin{aligned} S_r(n) = \cos \left[ \frac{2\pi}{2^N} \cdot nK \right] &\frac{2\pi}{2^N} \cdot \\ \sin \left[ \frac{2\pi}{2^N} \cdot nK \right] &\cdot \epsilon_p(n) \quad (7) \end{aligned}$$

其中  $S_\epsilon(n) = \frac{2\pi}{2^N} \cdot \sin \left[ \frac{2\pi}{2^N} \cdot nK \right] \cdot \epsilon_p(n)$

就是 DDS 输出信号频谱中出现杂散噪声的根源。该误差序列的连续时间信号  $S_\epsilon(t)$  是周期为  $\lambda T_c$  的信号。这个信号还可以分解为两个周期信号  $\epsilon_p(t)$  和  $S'(t)$  的乘积, 即

$$S_\epsilon(t) = \frac{2\pi}{2^N} \epsilon_p(t) \cdot S'(t) \quad (8)$$

其中,  $S'(t)$  在一个周期内可表示为

$$S'(t) = \sum_{n=1}^{\mu-1} \sin \left[ \frac{2\pi}{2^N} \cdot Kn \right] q(nT_c)$$

$$0 \leq t \leq \mu T_c \quad (9)$$

通过  $S'(t)$  的傅氏变换, 可以得到  $S'(\omega)$  的表达式(略), 对表达式分析说明, 波形误差信号包含的杂散频率分量为

$$f_z = lf_c \pm f_o \pm f_n$$

$$(l = 0, \pm 1, \pm 2, \dots; n = 1, 2, 3, \dots)$$

其中  $f_o$  为输出频率;  $f_c$  为时钟频率;  $f_n$  是误差信号  $\epsilon_p(t)$  的频谱在  $(0, f_c/2)$  内幅度第  $n$  个大的频率分量, 频率对应的幅度:

$$A_0 = \pi \cdot \frac{2^{B-N}}{n} Sa \left[ \frac{lf_c \pm f_o}{f_c} \right] Sa \left[ \frac{f_n}{f_c} \right] \pi \quad (10)$$

这就说明在相位舍位的情况下, 在主谱周围产生杂散频率信号, 且幅值是不同的, 图 3 给出了 DDS 在相位舍位情况下的输出频谱。

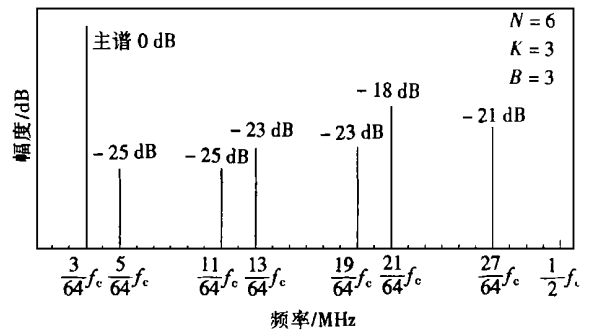


图 3 DDS 在相位舍位条件下的输出频谱

5) 幅度量化误差对 DDS 输出频谱的影响

实际的 DDS 系统中, ROM 存储的波形样点的幅度编码是由有限位二进制数表示的, 这样就存在着幅度量化误差, 纯粹从量化观点看, 设正弦波的样点值用  $D$  位二进制码表示, 则信号功率与量化噪声总功率之比近似为

$$R_{(S/N)} \approx 6.02D + 1.76 \text{ dB} \quad (11)$$

可见, 幅度量化的信噪比随着量化位数  $D$  的增加而提高。如果  $D = 12$ , 那么幅度量化的信噪比能达到 72 dB。

6) DAC 非线性对输出频谱的影响

DAC 非线性包括差分、积分非线性, DAC 转换过程中的尖峰电流, 转换速率受限等特性。在高频、超高频 DDS 系统中, DAC 的非线性逐步成为 DDS 输出杂散的主要来源之一。DAC 的非线性特性对 DDS 输出谱的影响表现为产生输出频率的谐波分量及这些谐波分量的镜象分量, 即含有频率为

$$f_m = lf_c \pm nf_n$$

$$(l = 0, \pm 1, \pm 2, \dots; n = 2, 3, \dots)$$

分量, 如图 4 所示。

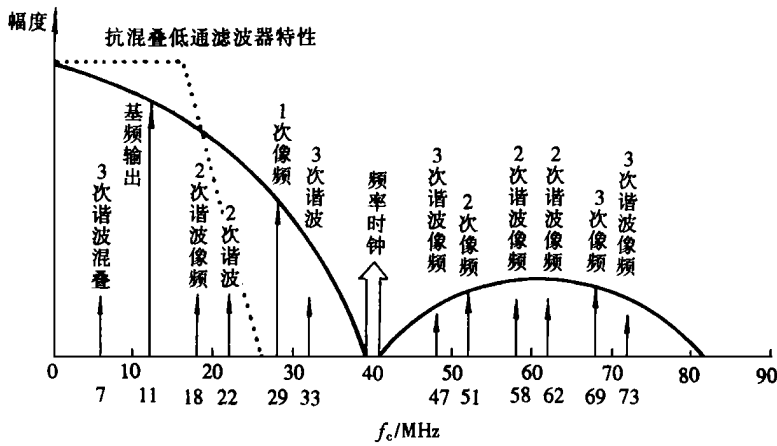


图4 DAC非线性对DDS输出的影响

### 3 结束语

以上分析了DDS的主要噪声源及数字化硬件对输出信号频谱纯度的影响,所得出的结论对提高DDS输出信号的谱纯度、设计性能优越的输出滤波器有实际的指导意义。

#### 参 考 文 献

1 许慧波 张厥盛. DDS——直接数字式频率合成器综述. 西

安: 西安电子科技大学出版社, 1989

- 2 王建新, 张先萌. 直接数字频率合成中相位截断误差分析. 电子测量与仪器学报 1995, 9(1): 1~6
- 3 Jerney J, Radar C M, Gold B. A digital frequency synthesizer. IEEE Trans Audio Electroacoust. 1971, Au-19: 48~57
- 4 Reinhardt V, Gould K, McNab K, *et al.* A short survey of frequency synthesizer techniques. Hughes Aircraft Company Space and Communications Group, 40th Annual Frequency Control Symposium, 1986. 355~363
- 5 田 良. 直接数字合成器专用集成电路的性能及应用. 国外电子测量技术, 1996(5): 14~17

## Direct Digital Synthesizer (DDS) and Performance Analysis

Gao Zexi Gao Cheng

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics Dept. of System Engineering of Engineering Technology)

**Abstract** This paper introduces the composition, operational principle and performance of DDS, and uses signal theory and method to analyze the effect of phase noise, spurious noise and digital phase truncation error on output wave form and the effect of DAC non-linearity on spectrum purity in detail. Analysis formula and correspondence curve in question are also provided. The conclusion is some instructive to increase the quality of DDS output signal.

**Key words** frequency synthesizers; frequency spectrum; resolving power; phase noise