

直接数字频率合成器中的相位噪声分析*

张骏凌** 张玉兴

(电子科技大学电子工程系 成都 610054)

【摘要】 相位噪声和杂散性能是制约直接数字频率合成器(DDS)用于高稳定频率源的关键指标。

文中给出了一种全新思维,定量分析了 DDS 中由相位截断引起的杂散谱及由相位截断、ROM 存储器有限字长和 DAC 性能对其相位噪声性能的影响。

关键词 直接数字频率合成器; 相位截断; 杂散; 相位噪声

中图分类号 TN74

直接数字频率合成器(DDS)由于其极高的频率分辨率,易实现捷变频,控制方便及能灵活产生多种信号,从问世以来广泛地受到关注。在实际应用中,DDS的杂散抑制差且分布难预测一直限制其应用范围。另外,当DDS应用于高稳定频率源时,其相位噪声性能是极重要的指标。

H.T.Nicholas 于 1987 年第一次对 DDS 由于相位累加器相位截断产生的杂散进行了理论分析^[1]; E.M.Mattison 等人在实验的基础上,得出了 DDS 的相位噪声和锁相环的相位噪声处于同等量级的结论^[2]; V.F.Kroupa 对 DDS 中由 ROM 存储器有限字长和 DAC 性能对其输出相噪的影响作了理论分析^[2,3]。本文在此基础上,用一种简单直观的新方法推导了 DDS 芯片中由于相位累加器相位截断引起的杂散谱的准确分布和相应的幅度及其对 DDS 相位噪声性能的影响,定量给出了 AD9850 芯片中由相位截断引起的噪声基底;同时讨论了 ROM 存储器的有限字长,以及 DAC 对 DDS 输出相噪的影响。

1 DDS 芯片中相位噪声恶化分析

1.1 DDS 芯片中的主要杂散

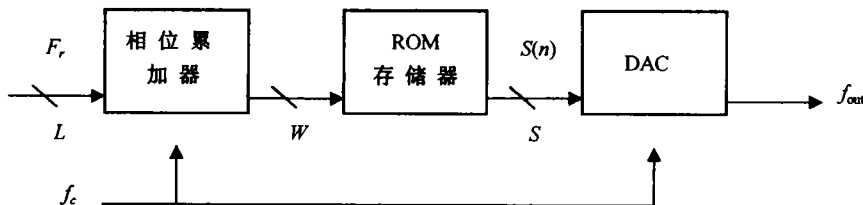


图1 DDS原理框图

DDS的基本原理框图如图1所示。频率控制字 F_r 的字长为 L (二进制,下同);经相位累加器截断低位后输出字长为 W 位,则被截断的位数为 $B=L-W$;由相位累加器驱动 ROM 存储器输出幅度序列函数 $S(n)$,其幅度字长为 S 。DDS 的主要杂散来自相位累加器的相位截断、ROM 存储器的有限字长和 DAC 三个方面。

1.2 相位截断对输出相噪的影响^[1,3,4]

如图1所示,DDS输出频率为

$$f_{out} = \frac{F_r}{2^L} f_c \quad (1)$$

其输出的理想时域函数为

1998年5月27日收稿,1998年7月24日修改定稿

* 国家“九五”重点科研项目

** 男 27岁 硕士生

$$\sin(2\pi \frac{F_r}{2^L} m) \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad (2)$$

在不考虑 ROM 存储器的有限字长和 DAC 性能的情况下, 由于相位累加器产生相位截断, 则 DDS 输出为

$$\sin[2\pi \frac{2^B}{2^L} \text{int}(m \frac{F_r}{2^B})] = \sin[2\pi \frac{F_r}{2^L} m - S(m)] \quad (3)$$

式中 $\text{int}(\cdot)$ 为取整函数; $S(m)$ 为相位累加器输出的误差序列函数

$$S(m) = 2\pi \frac{2^B}{2^L} [mF_r - 2^B \text{int}(m \frac{F_r}{2^B})] = 2\pi \frac{1}{2^L} S'(m) \quad (4)$$

$$S'(m) = 2^B [m \frac{F_r}{2^B} - \text{int}(m \frac{F_r}{2^B})] \quad (5)$$

相位误差序列 $S'(m)$ 可看成对一锯齿波函数 $S'(t)$ 采样得到^[1,3]。锯齿波函数的幅度为 2^B , 周期为

$$\frac{2^B}{\langle F_r \rangle_{2^B}} \quad (6)$$

式中 $\langle F_r \rangle_{2^B}$ 表示 F_r 模 2^B 的余数。

由于采样函数 $S'(m)$ 的周期和 $S'(t)$ 的周期不一致, $S'(m)$ 的周期应不小于 $S'(t)$ 的周期。因此相位误差序列 $S'(m)$ 是以

$$\frac{2^B}{(F_r, 2^B)} \quad (7)$$

为周期的。其中 $(F_r, 2^B)$ 表示 F_r 和 2^B 的最大公约数。因此, $S'(m)$ 的频谱是以

$$\Delta f = \frac{(F_r, 2^B)}{2^B} f_c \quad (8)$$

为间隔。所以, 在 $0 \sim \frac{f_c}{2}$ 的频率范围内, 由相位累加器相位截断而引起的杂散谱线的位置应满足下列不等式

$$0 < pf_c \pm f_0 \pm q\Delta f < \frac{f_c}{2} \quad p = 0, 1, 2, \dots \quad q = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots \quad (9)$$

当 F_r 为奇数时 (一般如此), 由式 (7), 相位误差序列 $S'(m)$ 的周期为 2^B , 将锯齿波函数 $S'(t)$ 的周期扩大至 $2^B T_c$, 由傅氏变换

$$S'(t) \leftrightarrow F_{S'}(n\omega_0)$$

$$F_{S'}(n\omega_0) = \frac{1}{T} \int_0^T S'(t) \exp(-jn\omega_0 t) dt = j \frac{2^B}{2\pi n} \sum_{r=1}^{F_r} \exp(-j \frac{2\pi n}{F_r} r), T = 2^B T_c \quad (10)$$

由式 (4)、(5)、(10) 得

$$|F_{S'}(n\omega_0)| = 2\pi \frac{1}{2^L} |F_{S'}(n\omega_0)| = \frac{1}{n2^L} \left| \sum_{r=1}^{F_r} \exp(-j2\pi n \frac{r}{F_r}) \right| \quad (11)$$

式 (11) 给出了 DDS 中由相位累加器相位截断引起的输出杂散的位置和幅度。如上面所述, 式 (11) 得出是基于对误差函数 $S'(t)$ 周期扩大而进行的, 避免了对 $S'(t)$ 进行单周期分析时, 计算通频带内所有杂散谱位置所需的烦琐推导^[1,3]。周期扩大的表达式由式 (7) 给出。当

$$n = mF_r, \quad m \text{ 为整数} \quad (12a)$$

由式 (11) 得

$$|F_S(n\omega_0)| = \frac{1}{m2^W} \quad (12b)$$

当 $n \neq mF_r$ 时, $|F_S(n\omega_0)|$ 非常小。

应该注意到, F_r 比较大且 $n \neq mF_r$ 时, 式 (11) 的结果应接近于零。 F_r 为奇数时, 由式 (8)

$$\Delta f = \frac{f_c}{2^B}$$

杂散谱线出现的位置应满足式(9)。因此, 由于相位截断和采样交迭引起的在通频带每 1 Hz 范围内至少有一根谱线需要作 Δf 次交迭, 或考虑 $\frac{\Delta f}{2}$ 个副瓣内谱线交迭的影响。根据相位噪声频谱密度的定义, 在每 1 Hz 范围内出现的谱线可以认为是噪声。因此, 当杂散谱线在通频带每 1 Hz 范围内至少有一根谱线时, 就要出现噪声且影响 DDS 的输出相位噪声性能。

下面计算一种型号为 AD9850 的 DDS 芯片的有关参数。由于相位截断引起的相位噪声恶化, 其参数为: $f_c = 120$ MHz, $f_0 = 30$ MHz, $B = 18$, $W = 14$, $L = 32$, $F_r = \frac{2^{32}}{4} - 1$, $\Delta f = \frac{f_c}{2^B} = \frac{120 \times 10^6}{2^{18}} \approx 458$ Hz。考虑采样引起的交迭, 至少有 229 个副瓣以上的谱线交迭才会在距 f_0 任意位置处 1 Hz 范围内有一根谱线。考虑在 $f_0 + 1$ kHz 处 $f_c - f_0$ 的影响

$$n = \frac{f_c - 2f_0 - 1 \times 10^3}{\Delta f} = \frac{120 \times 10^6 - 60 \times 10^6 - 1 \times 10^3}{458} \approx 131\ 002$$

代入式 (11)

$$|F_S(m\omega_0)| = \frac{1}{n2^W} \left| \sum_{r=1}^{F_r} \exp(-j \frac{2\pi nr}{F_r}) \right| < \frac{1}{n2^W} \quad (13)$$

将 n 代入式(13), 得出的幅度和主谱线的幅度之比为

$$< -20 \lg(2^W n) = -186 \quad (\text{dBc/Hz})$$

可见, 在此 DDS 芯片中, 由相位截断引起的输出相噪恶化很小, 而且上例为最差的情况, 实际中应更小。

通过上面的实例并结合对式 (11) 的分析, 得出如下结论: 在 DDS 中, 由相位截断引起的输出相位噪声的恶化可忽略不计。

1.3 ROM 存储器有限字长对输出相噪的影响^[3]

ROM 存储器有限字长对输出相噪的影响为^[3]

$$-2 - 6(S-1) - 10 \lg(f_c) \quad (\text{dB}) \quad (14)$$

1.4 DAC 对输出相噪的影响^[2-4]

DAC 有限分辨率引起的量化噪声同 ROM 存储器有限字长的影响一样, 可延用 1.3 节中的结果。DDS 中 DAC 由 ROM 存储器直接驱动, 如两者的字长相同, 输出相噪在式 (14) 的基础上增加 3 dB

$$1 - 6(S-1) - 10 \lg(f_c) \quad (\text{dB}) \quad (15)$$

DAC 的内部噪声可分为

$$i_n = i_{n1} + i_{n2}$$

式中 i_{n1} 为 DAC 内部闪烁噪声, 对 DAC 的每一位, 所产生的 i_{n1} 不相关; i_{n2} 由电源噪声引起, 对 DAC 的每一位, 所产生的 i_{n2} 相关。由于 DAC 的内部噪声分析须针对特定的内部结构, 所以不作深入地分析。一般来说, 当前的 DAC 噪声性能已经低于 -165 dBc/Hz。

2 结 论

本文推导了一种新的分析 DDS 中由相位截断引起的杂散谱的方法, 详细地讨论了 DDS 中由相位截断对输出相噪的影响。相位截断和 DAC 的内部噪声对 DDS 的输出相噪影响很小; DDS 的输出相噪主要由 ROM 存储器有限字长及 DAC 的位数决定, 大小由式(14)给出。

需要注意的是, 本文没有讨论时钟源对 DDS 输出相噪的影响, 这是因为目前的石英晶体振荡器的相噪已可作到低于 $-160\text{dBc}/\text{Hz}@1\text{ kHz}$ 。

参 考 文 献

- 1 Nichols H T, Samuelli H. An analysis of the output spectrum of direct digital frequency synthesizers in the presence of phase-accumulator truncation. Proc 41st, AFCS, 1987: 495~502
- 2 Mattison E M, Coyle L M. Phase noise in direct digital synthesizers. 42nd Annual Frequency Control Symposium, 1988: 352~356
- 3 Kroupa V F. Discrete spurious signal and back ground noise in direct digital frequency synthesizers. 1993 IEEE International Frequency Control Symposium, 1993 : 242~250
- 4 张玉兴, 彭清泉. DDS 在雷达中的应用. 电子科技大学学报, 1997, 26 (增): 17~21
- 5 Papoulis A. Signal analysis. New York: McGraw-Hill, 1965

Analysis of Phase Noise in DDS

Zhang Junling Zhang Yuxing

(Dept. of Elect. Eng., UEST of China Chengdu 610054)

Abstract Phase noise and spurious spectrum are the key characters in direct digital synthesizers (DDS) applied in the high stable frequency source. Actually, the poor performance of spurious spectrum from DDS has always restrained its applications. This paper introduces a new way to analyze the spurious spectrum and phase noise generated by the phase truncation. The locations and amplitudes of spurious spectrum are precisely determined. Phase noise generated by the size of ROM look-up table and the performance of DAC is also investigated.

Key words direct digital synthesizers; phase truncation; spurious spectrum; phase noise