

基于 DDS 的低相噪频率综合源设计^{*}

谢仁宏 是湘全

(南京理工大学电子工程与光电技术学院 南京 210094)

【摘要】 分析了相位累加器截断、波形 ROM 有限字长、DAC 等对直接数字频率合成器 (DDS) 相位噪声的影响, 得出了 DDS 芯片本身对输出信号相位噪声影响很小的结论。给出了采用 AD9854 芯片构成的低相噪频率综合源的硬件组成以及系统实测的相位噪声、杂散技术指标。

【关键词】 直接数字频率合成, 相位噪声, 相位截断, 杂散频谱

Design of Low Phase Noise Frequency Synthesizer Based on DDS

XIE Ren-hong SHI Xiang-quan

(School of electronics Engineering and Optoelectronic Technology, NUST Nanjing 210094)

【Abstract】 The influences on phase noise of direct digital frequency synthesizer with truncation of the phase information stored in the accumulator, truncation of sine words in look-up tables and finite bit resolution of DAC are analyzed, It is shown that the effect of DDS chip itself on the phase noise of output signal can be neglected. The hardware constitution of a low phase noise frequency synthesizer using AD9854 and the measured performances of system phase noise and spurious spectrum are presented.

【Key words】 direct digital frequency synthesizer, phase noise, phase truncation, spurious spectrum

1 引言

频率综合源是雷达、通信及其他电子系统不可缺少的重要组成部分, 其相位噪声指标对系统的性能有很大的影响^[1]。因此, 低相位噪声、高稳定度、高可靠性的频率综合源设计成为保证系统性能的重要内容。目前, 常用的频率综合技术有: 锁相频率合成、直接频率合成和直接数字频率合成 (DDS)^[2,3]。在要求信道间隔小、信道频率数多、相位噪声低的应用场合^[4], 采用直接数字频率合成技术是比较理想的选择, 分析了影响直接数字频率合成器相位噪声的主要因素, 给出了采用 AD9854 芯片构成的低相噪频率综合源的硬件框图以及系统实际测试的相位噪声、杂散技术指标: 10MHz 参考时钟在偏离中心频率 1Hz 处相位噪声为 -100dBc/Hz, 在 6~20MHz 输出信号频率范围内, 输出信号的相位噪声在偏离中心频率 1Hz 处优于 -82dBc/Hz, 杂散性能优于 -90dB。

2 DDS 相位噪声恶化分析

影响 DDS 相位噪声的主要因素包括累加器相位截断、正弦表 ROM 存储器有限字长、DAC 的有限分辨率和内部噪声等方面。

2.1 相位截断对输出相位噪声的影响

设相位累加器为 N 位, 其中高 A 位用来寻址波形 ROM, B 为相位截断位数, 则有 $B = N - A$; 相位误差序列为 $e_p(n)$, 由于相位截断造成的量化误差为 $p(n)$, 则有

$$p(n) = \frac{2}{2^N} e_p(n) \cos \left[\frac{2}{2^N} n K \right] \quad (1)$$

其中 $e_p(n)$ 的周期为 $u_k = 2^N / \text{GCD}(2^N, K)$, K 为频率控制字, $\text{GCD}(2^N, K)$ 表示 2^N 和 K 的最大公约数。

假定 $e_p(n)$ 为 $[0, 2^B]$ 内均匀分布的白噪声序列, 则由于相位截断造成的杂散总功率 P_p 为

$$P_p = \frac{1}{u_k} \sum_{n=0}^{u_k-1} E \left[\frac{2}{2^N} p(n) \right] \quad (2)$$

将式(2)展开, 因

$$E \left[e_p^2(n) \right] = \int_0^{2^B} \frac{1}{2^B} x^2 dx = \frac{1}{3} 2^{2B},$$

有

$$P_p = \frac{2}{3} 2^{-2A} \quad (3)$$

由文献[8]可知, 相位截断的杂散谱在 $(0, f_c)$ 内由 $2^B / \text{GCD}(2^B, K)$ 根离散谱线组成。假设所有杂散谱线的平均功率为 $S_p(n)$, 则有

* 收稿日期: 2002-12-30 修订日期: 2003-03-10

$$P_p = \frac{2^B}{\text{GCD}(2^B, K)} < S_p(n) > \quad (4)$$

由式(3)、(4)得到

$$S_p(n) = \frac{2^2}{3} 2^{-2A} \frac{\text{GCD}(2^B, K)}{2^B} \quad (5)$$

相位截断产生的杂散谱线的间隔 f_p 为

$$f_p = f_c / 2^B \quad (6)$$

由式(6)可得到 1Hz 带宽内的杂散谱线数。设相位截断造成的背景噪声单边带功率谱密度为 $S_p(f)$, 则 $S_p(f)$ 为

$$S_p(f) = \frac{S_p(n)}{f_p} \quad (7)$$

由式(5)~(7)并假定频率控制字 K 为奇数,得到

$$S_p(f) = \frac{2^2}{3} \frac{2^{-2A}}{f_c} \quad (8)$$

用 dB 表示为

$$8.2 - 6A - 10\log f_c (\text{dB}) \quad (9)$$

由式(9)可知,对一般的 DDS 芯片,由于相位截断造成的输出信号相位噪声恶化很小。如对 AD9854,其 $N=48$, $A=17$, $B=31$, $f_c=180\text{MHz}$, 相位截断造成的相位噪声为 -180dBc/Hz 。

2.2 ROM 存储器有限字长对输出相噪的影响

设波形 ROM 的位数为 D ,由文献[7]得到由幅度量化误差造成的输出背景噪声的单边带功率谱密度为

$$S_a(f) = \frac{2}{3} \frac{2^{-2D}}{f_c} \quad (10)$$

用 dB 表示为

$$-2 - 6D - 10\log f_c (\text{dB}) \quad (11)$$

2.3 DAC 对输出信号相位噪声的影响

DAC 有限分辨率引起的量化噪声同波形 ROM 有限字长的影响一样,其分析方法同 2.2。由文献[7]的结论,若 DAC 的位数为 D ,则 DAC 有限分辨率对输出信号相位噪声的影响为

$$1 - 6D - 10\log f_c (\text{dB}) \quad (12)$$

3 频率综合源的硬件设计

由 DDS 构成的低相噪频率综合源系统组成框图如图 1 所示。系统由 AD9854 直接数字频率合成器、控制接口隔离、时钟驱动、高稳定参考时钟、低通滤波器、

低噪声宽带放大器等部分组成。

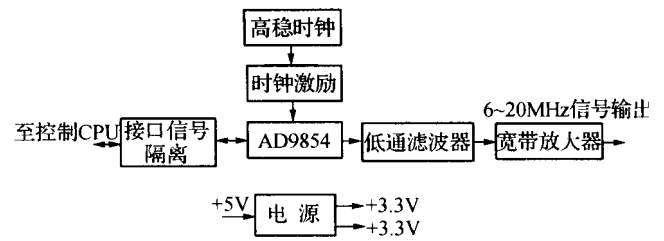


图 1 频率综合源组成框图

在本系统中 DDS 芯片使用 ADI 公司的时钟频率高达 300MHz、功能极其完善的 AD9854 芯片。该芯片可工作于单频信号产生、FSK/PSK 调制信号产生、CHIRP 信号产生等工作模式;芯片内具有 X4~X20 可编程时钟倍频器;具有高速串行或并行控制接口,AD9854 提供的 CHIRP 信号产生功能特别适合于高性能雷达激励信号的产生。有关 AD9854 的功能和操作、控制方法见文献[9]。在本系统中高稳定晶振频率为 10MHz,并采用单端激励方式提供给 DDS,使用 AD9854 内部的倍频器得到 180MHz 的工作时钟。考虑到系统对频率更新速率要求不高,控制接口采用串行方式,并使用速率高达 100Mbps 的磁耦合隔离器件,实现与数字控制系统的隔离。硬件系统中的低通滤波器使用无源 LC 滤波器,其 3dB 带宽为 35MHz,在 40MHz 处的阻带衰减优于 40dB。

4 实验结果及分析

由引起 DDS 相位噪声恶化的因素分析可知,相位截断、波形 ROM 的有限字长和 DAC 的有限分辨率和内部噪声对输出信号的相位噪声影响很小,基本可以不用考虑,参考时钟和电路设计决定了输出信号相位噪声性能。

本系统在确定了硬件系统结构后,精心设计了硬件电路,完成系统调试和功能测试后对输出信号的相位噪声和杂散性能进行了测试。图 2 为 10MHz 参考时钟的相位噪声曲线,参考时钟在偏离中心频率 1Hz 处相位的噪声为 -100dBc/Hz 。图 3 为输出的频率 10.7MHz 时相位噪声曲线,在偏离中心频率 1Hz 处相位噪声为 -97dBc/Hz 。由此可知,由电路本身所造成相位噪声恶化约为 2.5dB。图 4 为输出频率 21.7MHz 时相位的噪声曲线,在偏离中心频率 1Hz 处相位的噪声优于 -82dBc/Hz 。测试结果表明,使用相位噪声为 -100dBc/Hz @1Hz 的参考时钟,频率综合源可以实现输出频率范围内偏离中心频率 1Hz 处相位噪声优于 -82dBc/Hz 的技术指标。

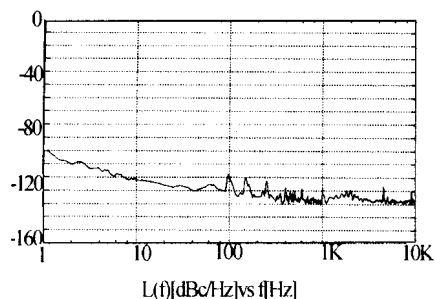


图 2 参考时钟相位噪声

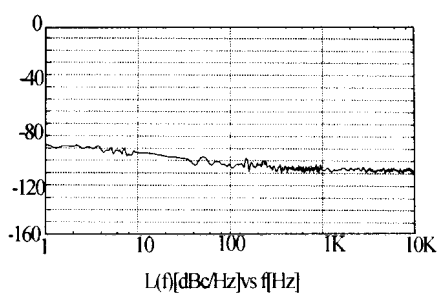


图 3 10.7MHz 输出信号相位噪声

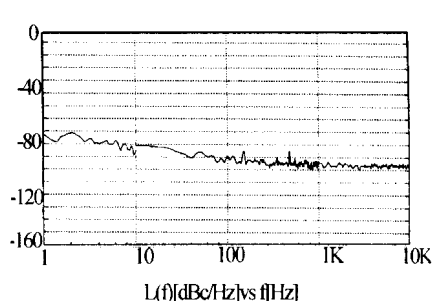


图 4 21.7MHz 输出信号相位噪声

对整个频率范围内输出信号的杂散性能,使用 HP8563EC 频谱分析仪进行了测试,在 $\pm 20\text{kHz}$ 的带宽内杂散性能优于 -90dB 。

5 结束语

通过分析和实际测试结果表明,直接数字频率合成技术是实现低相噪频率综合的一种简便可行的技术途径。从硬件设计提高相位噪声性能考虑,时钟的倍频、激励方式,供电电源设计,隔离电路设计,低通滤波器设计等方面都必须得到设计人员的重视。

参 考 文 献

- 1 白居宪. 低相噪频率综合. 西安:西安交通大学出版社,1995
- 2 张厥盛, 郑继禹, 万心平. 锁相技术. 西安:西安电子科技大学出版社,1994
- 3 李明斌. 直接数字频率合成的原理及频谱特征分析. 电讯技术, 1995, 35(4): 16~23
- 4 包养浩, 王军. 超视距雷达系统设计考虑. 现代雷达, 1991, 13(1): 1~6
- 5 张骏凌, 张玉兴. 直接数字频率合成器中的相位噪声分析.

电子科技大学学报, 1999, 28(1): 24~27

- 6 Mattison E M, Coyle L M. Phase noise in direct digital synthesizers. 42st Annual Frequency Control Symposium, 1988: 352~356
- 7 Kroupa V F. Discrete spurious signal and back ground noise in direct digital synthesizers. IEEE International Frequency Control Symposium, 1993: 242~250
- 8 Henry T. Nicholas III, H. Samueli. An analysis of the output spectrum of direct digital frequency synthesizer in the presence of phase - accumulator truncation. 41st annual frequency control symposium, 1987: 495~502
- 9 Analog Devices Inc. CMOS 300MPS Quadrature Complete DDS AD9854. ADI data sheet, 2000

谢仁宏 男, 副教授, 在职博士。1990年毕业于南京理工大学电光学院, 获工学硕士。主要从事近程侦察雷达的研究和数字通信教学和科研。研制定型了两种近程侦察雷达。获部级科技成果二等奖一项和国防科工委型号研制铜奖。

是湘全 男, 教授, 博士生导师。主要从事雷达系统和雷达信号处理的研究和教学工作, 多次获得省部级科技成果奖和多项发明专利。

(上接第 34 页)

均方差都较大,在这种情况下,我们认为交替发射方式不能满足测速精度要求,而应采用同时发射方式。

总之,交替发射方式的测速精度较同时发射方式的测速精度低,但在信噪比较大或降水尺度不太大时,交替发射方式也能满足测速精度的要求。

参 考 文 献

- 1 刘黎平,等. 双线偏振雷达测雨效果的对比研究. 大气科学, 1996, 5(20): 615~619
- 2 Alexander Ryzhkov, Dusan Zrnica. Assessment of Rainfall Measurement That Uses Specific Differential Phase. J. Appl. Meteor. 1996, 35: 2 080~2 090
- 3 张鸿发,等. 差分反射率 ZDR 和反射率 Ze 测雨精度的对比分析. 大气科学, 1995, 1(19): 31~39
- 4 Balakrishnan N, Zrnica D S. Estimation of Rain and Hail Rates in

Mixed Phase Precipitation. J. Atmos Oceanic Technol, 1990, 47(5): 565~583

- 5 刘 力. 新一代天气雷达—具有双偏振功能的多普勒雷达. 气象, 1996, 22(8): 49~55
- 6 Zahrai A, Zrnica D S. The 10-cm Wavelength Polarimetric Weather Radar at NOAA's National Storms Laboratory. J. Atmos Oceanic Technol., 1993, 5(10): 649~653
- 7 Sirmans D, Bumgarner B. Numerical comparison of Five Mean Frequency Estimators. J. Appl. Meteor., 1975, 14: 991~1 003

李妙英 女, 讲师, 2002年毕业于解放军理工大学气象学院, 硕士学位。主要从事气象雷达资料应用的研究。

胡明宝 男, 副教授, 毕业于南京气象学院, 硕士学位, 主要从事雷达气象方面的研究。

贺宏兵 男, 副教授, 毕业于空军导弹学院, 硕士学位, 现为解放军理工大学在读博士, 从事雷达信号处理的研究。