

无相位截断误差的 DDS 设计实现

沈 志, 王宏远, 王 振

(华中科技大学 电子与信息工程系, 湖北 武汉 430074)

摘 要: 通过修改传统的直接数字合成(DDS)设计方法, 提出了一种无相位截断误差的 DDS 设计方案. 该方案降低了系统正弦采样存储表的需求空间, 减轻了存储量对提高信号精度的限制, 消除了传统设计中相位截断给最终输出信号频谱的影响, 提高了 DDS 的性能. 该方案可以应用于载波合成, 频偏调制等通信信号处理领域, 可采用 FPGA, DSP, MCU 等各种硬件平台予以实现.

关键词: DDS; 相位截断; 杂散

中图分类号: TN713

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2011)03-0070-03

None Phase Truncation Error DDS Implementation

SHEN Zhi, WANG Hong-yuan, WANG Zheng

(Department of Electronics and Information Engineering,
Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: By modifying the traditional Direct Digital Synthesizer (DDS) design method, a novel solution without phase truncation error is introduced in this paper. It has reduced the storage requirement for the sine-wave samples, eliminated the storage limitation to the signal precision improvement, and avoided the infection which comes from the phase truncation error to the final signal spectrum; consequently, the DDS performance is meliorated. This method is applicable in carrier generation, frequency-offset modulation and some other communication signal processing area, and could be implemented on many hardware platforms such as FPGA, DSP and MCU.

Key words: DDS; phase truncation; signal stray

1 引言

直接数字频率合成技术(DDS)最早由 J. Tierney 于 1971 年提出^[1], 随着 VLSI 技术飞速进步, 数字电路系统可工作时钟频率的极限被不断刷新. DDS 技术在通信领域的应用, 已经从传统的基带信号处理, 中频信号处理逐渐延伸到射频信号处理领域, 可实现的信号频带范围越来越大, 甚至推动了以其为基础的软件无线电(SR)课题的研究与进步.

DDS 作为通信系统的数字频率源, 是整个信号系统的“心脏”, 其性能直接关系到通信信号的各项指标. 除晶振纯度, 数模转换误差等原始硬件误差外, 幅度量化误差, 相位截断误差是数字域对最终信

号质量影响最大的因素^[2-3], 已经有很多文章试图从各角度减少其影响^[4]. 以上二者中, 又以降低相位截断误差的代价最大, 从后文分析中可以看到, 幅度量化误差可以通过线性增长采样存储器的方式得以降低, 而相位截断误差影响的减小则需要指数增长存储器才能够获得.

本文通过修改传统 DDS 的设计步骤, 将最终输出信号频率, 步进频率及系统时钟频率结合起来, 共同设计 DDS 系统的波形查找表存储方式, 从而达到消除相位截断误差的目的.

2 传统 DDS 模型及杂散来源

传统的 DDS 模型如图 1 所示, 它的数字部分

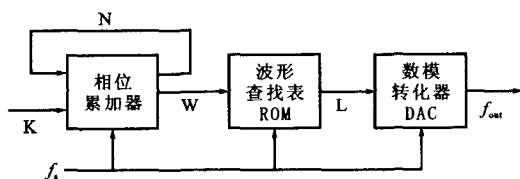


图1 DDS 工作原理图

主要由一个累加器和一个正弦查找表组成,累加器输出对查找表进行寻址获得当前信号幅值,送数模转换器生成模拟信号输出。其中 N 为累加器位宽, W 和 L 分别为查找表的地址位宽和输出数据位宽, f_s 为系统时钟主频, K 为频率控制字, f_{out} 为输出信号频率

$$f_{out} = f_s \cdot K / 2^N \quad (1)$$

实际实现中,由于查找表的位宽及深度的有限会造成幅度量化及相位截断的误差,故真实的信号输出可表示为

$$y(n) = \frac{1}{2^{L-1}} \text{round} \left\{ 2^{L-1} \cdot \sin \left[2\pi \cdot \frac{1}{2^W} \cdot \text{trunc} \left[\frac{K \cdot n}{2^{N-W}} \right] \right] \right\} \quad (2)$$

$\text{round}[\]$ 为舍入取整函数, $\text{trunc}[\]$ 为截尾取整函数。

DDS 的量化噪声来源于正弦查找表中的二进制幅度值表示,它在实际输出频谱中以等概率密度函数形式出现,其影响的是输出频谱的噪声平面值,可以被近似为^[5]

$$\text{SNR} = -6.02L - 1.76 \text{ dB} \quad (3)$$

由式(3)我们可以知道,增大 W 会带来更大的信噪比(SNR),这可以通过增加查找表数据位宽的方式获得,在此过程中波形查找表的只读存储器(ROM)将线性增长。

而 DDS 的相位截断误差会对输出频谱引入干扰噪声频点,当 DDS 的各个参数为确定值时,它将出现在频谱的固定位置,影响的是输出信号的无杂散动态范围(SFDR)。在文献[6]中定义输出频谱最大的相位截断误差近似为

$$S_{\max} = \left[2^W \text{sinc} \left(\frac{\pi \cdot (f_{out}, 2^{N-W})}{2^{N-W}} \right) \right]^{-1} \quad (4)$$

通过估算式(4)中 sinc 函数的一阶泰勒展开式可以得到

$$S_{\max} = -6.02W + 3.992 \text{ dB} \quad (5)$$

可以看到增大 W 的值可以降低相位截断噪声,但是当增大 W 意味着存储器地址位宽的增加,将带来存储器容量以 2 的指数幂的速度增长。

对比式(3)和式(5)可以知道,当我们将 W 和 L

选为相同值的时候,相位误差带来的干扰频率幅值将高于量化误差的噪声平面大约 5.75 dB,所以,在传统 DDS 实现中,一种比较合理的选择是

$$W = L + 1 \quad (6)$$

当满足式(6)时,使用相等容量查找表 ROM 的 DDS 将获得最大的整体输出信噪比。

3 无相位截断 DDS 设计方法

幅度量化误差我们只能通过增加量化位宽的方式获得,但是相位截断误差,我们可以通过修改累加器及存储器深度的设计方式使之消除。

对于式(2),我们将频率字 K 表示为初始频率 K_0 及其步进频率 K_{step} 的组合;

$$K = K_0 + m \cdot K_{\text{step}} \quad (7)$$

将累加器到查找表之间的截断值 2^{N-W} 表示为 R ,而将查找表存储深度表示为 D ,且暂时只考虑其相位误差,可以将式(2)重写为

$$y'(t) = \sin \left[\frac{2\pi}{D} \cdot \text{trunc} \left[\frac{K_0}{R} \cdot n + \frac{K_{\text{step}}}{R} \cdot mn \right] \right] \quad (8)$$

由式(8)可以知道, K_0/R 及 K_{step}/R 是公式中产生截断值的部分,DDS 的相位截断误差就因为这两个部分需要在计算后舍入取整所引入,故对这两个部分进行适当处理,消除其计算舍入,就可以消除 DDS 的相位截断误差。

当 DDS 输出固定频率值,即只有 K_0 时,保证 K_0/R 计算值为整数,即可保证没有截断误差;当 DDS 输出变化频率值,即同时存在 K_0 和 K_{step} 时,保证 K_0/R 及 K_{step}/R 计算值都为整数,即可以保证没有截断误差。使用与式(8)相同的符号表示方法,式(1)可以被改写为

$$K = DR \cdot f_{out} / f_s \quad (9)$$

同时有

$$f_{out} = f_0 + m \cdot f_{\text{step}} \quad (10)$$

将式(9)、(10)代入式(8),仅观察被截断部分有

$$\text{trunc} \left[\frac{f_0}{f_s/D} \cdot n + \frac{f_{\text{step}}}{f_s/D} \cdot mn \right] \quad (11)$$

其中令

$$f_{\Delta} = f_s/D \quad (12)$$

f_{Δ} 为最小频率分辨率,式(12)代入式(11)有

$$\text{trunc} \left[\frac{f_0}{f_{\Delta}} \cdot n + \frac{f_{\text{step}}}{f_{\Delta}} \cdot mn \right] \quad (13)$$

从式(12)及式(13)我们可以知道, f_{Δ} 作为设计

模型的最小分辨率,当 DDS 输出固定频率时,将其设计为 f_{out} 和 f_s 的公约数;当 DDS 输出变化频率时,设计为 f_{step} 、 f_0 和 f_s 的公约数,则可以保证式(13)截尾函数内部计算所得为整数,则不产生计算误差.另外由式(12)可以知道,为减少查找表空间的消耗,可以将 f_{Δ} 取尽可能大值,即上述各数的最大公约数,就可以实现波形表存储空间最少消耗下的无相位截断误差 DDS 设计,故

$$f_{\Delta} = \text{GCD}(f_s, f_{\text{out}}) \quad (14)$$

或

$$f_{\Delta} = \text{GCD}(f_s, f_0, f_{\text{step}}) \quad (15)$$

$\text{GCD}()$ 表示取最大公约数函数.

4 无相位截断 DDS 设计步骤

步骤(1):由式(14)计算输出频率 f_{out} (当非固定频率有初值 f_0 及步进值 f_{step} 时使用式(15))与系统工作频率 f_s 的最大公约数 f_{Δ} ;

步骤(2):通过 $D = f_s / f_{\Delta}$ 确定波形查找表所需深度 D ,并根据 SNR 要求由式(3)计算得到量化位宽 L ,二者的乘积即为查找表 ROM 总的容量;

步骤(3):由方程式

$$y(n) = \frac{1}{2^{L-1}} \text{round} \left\{ 2^{L-1} \cdot \sin \left[\frac{2\pi}{D} \cdot n \right] \right\} \quad (16)$$

确定查找表 ROM 中的二进制存储值;

步骤(4):相位累加器最大值与查找表深度相同为 D ,固定频率输出时频率字 $K = f_{\text{out}} / f_{\Delta}$,非固定频率输出时有 $K_0 = f_0 / f_{\Delta}$, $K_{\text{step}} = f_{\text{step}} / f_{\Delta}$;

步骤(5):设计硬件结构,将以上各值代入即可.

5 设计实例及对比

设计实例(1):多载波 DVB 调制器中,系统主频为 55 MHz,需要产生 4 MHz 固定载波频偏,要求输出信号 SNR, SFDR 均达到 60 dB 以上.

由式(3)计算得到 $L > 9.67$ 取最小整数 $L = 10$,当使用传统 DDS 设计方式,设计累加器位宽为 32 bit,查找表深度为 128 时,最终输出频谱如图 2 所示.

当使用无相位截断误差的 DDS 设计方法时,计算得到 $f_{\Delta} = 1$ MHz,查找表深度设计为 $D = 55$,频率字 $K = 4$,最终输出频谱如图 3 所示.

由图 3 可以看出,新方法避免了通过指数增加查找表存储空间的方式提高 SFDR,仅使用最少数量的查找表深度,就消除了传统 DDS 设计中相位截

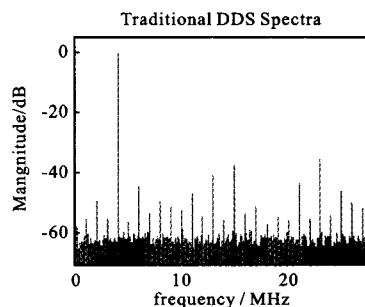


图 2 传统 DDS 输出频谱

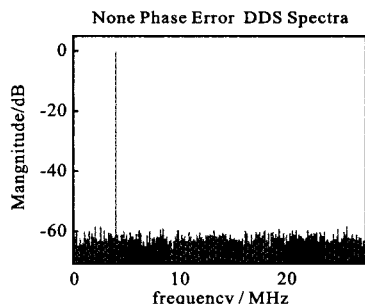


图 3 无相位截断误差 DDS 输出频谱

断带来的点频干扰,提高了输出频谱指标.对比实现该实例的两种结构的逻辑资源消耗如表 1 所示,新方法也存在优势.

表 1 两种实现消耗资源对比

结构	累加器位宽	查找表深度
传统 DDS	32	128
无相位截断 DDS	6	55

设计实例(2):跳频通信系统中,系统主频为 200 MHz,跳频最小频差为 0.5 MHz,起始频率段为 10 MHz,需要至少能产生 20 种频偏值.即需要生成频偏 DDS 产生从 10 MHz 到 19.5 MHz,步进 0.5 MHz 的正弦波.

使用新方法设计得到 $f_{\Delta} = 0.5$ MHz,故 $D = 400$, $K_0 = 20$, $K_{\text{step}} = 1$.

6 结束语

本文通过修改传统 DDS 的设计方法,从实际系统及需求出发反向设计实现结构,可以消除 DDS 系统中的相位截断误差.但需要注意的是,当设计输出频率与系统时钟量级差距过大的系统时,会导致查找表深度过大;另外,当 DDS 频率输出步进过小时,也会导致查找表暴增的情况出现.所以,本设计更适合于输出频率相对与系统主频较高,且仅输出频率变化步长不是很小的系统实现.

(下转第 76 页)

些僵尸程序向网络中的主机发送垃圾邮件. 社区 3 中的侦查智能体(蜜罐)发现僵尸网络, 检测智能体通过对邮件服务器和受害主机的日志分析, 不仅检测到本社区中的僵尸主机, 中心智能体对信息汇集处理后发给核心智能体(管理机). 然后, 核心智能体向各个中心智能体发送协同检测指令, 各个社区的智能体收到指令后调动本社区的检测智能体结项协同检测, 确定僵尸网络的控制点位置和僵尸主机位置. 最后, 核心智能体发出清除指令, 各个中心智能体收到指令后, 调动本社区的反制智能体清出本社区的僵尸网.

5 结束语

本文针对现有僵尸网络检测体系结构的不足, 提出了一个基于多智能体社会的协同防御模型, 并基于此模型提出一个僵尸网络协同防御体系结构. 该体系结构具有较强的可扩展性和可交互性, 可以灵活地部署在各种要保护的网络上, 适应各种应用环境. 此外, 该协同模型把对僵尸网络的侦查、检测和反制功能融合在一起, 能够对广泛分布的僵尸网络活动做出快速反应.

下一步的研究重点: 实现原型系统, 集成几种典型的检测技术, 并在真实的网络环境中运行, 评估检测结果, 以便对本文提出的协同防御体系结构做出针对性调整; 对于协同, 建立一个合理的关系模型, 并使得其具有局部感知和全局优化的能力, 进而帮助细化协同服务的体系结构.

参考文献:

- [1] Strayer T, Walsh R, Livadas C, et al. Detecting botnets with tight command and control[C]// Proc of the 31st IEEE Conf on Local Computer Networks (LCN' 06). Tampa: IEEE Computer Society Press, 2006: 195-202.
- [2] Livadas C, Walsh B, Lapsley D, et al. Using machine learning techniques to identify botnet traffic[C]// Proceedings 2006 31st IEEE Conference on Local Computer Networks. Tampa, FL: IEEE, 2006: 967-974.
- [3] 应凌云, 冯登国, 苏璞睿. 基于 P2P 的僵尸网络及其防御[J]. 电子学报, 2009, 37(1): 31-37.
- [4] 潘晓英, 焦李成. 项目优化调度的多智能体社会进化算法[J]. 计算机研究与发展, 2008, 45(6): 998-1003.
- [5] 李瑾妹, 刘静, 焦李成, 等. 一种基于多智能体进化的广义图染色算法[J]. 软件学报, 2009, 20(2): 315-326.
- [6] 倪凯. 基于 Agent 的空间数据挖掘研究[J]. 微电子学与计算机, 2007, 24(11): 87-91.
- [7] 赵辉. 基于 MAS 的作战指挥模型的通信技术实现[J]. 微电子学与计算机, 2007, 24(11): 107-109.
- [8] 陈刚, 陆汝钤. 关系网模型: 基于社会合作机制的多 agent 协作组织方法[J]. 计算机研究与发展, 2003, 40(1): 107-114.

作者简介:

李基初 男, (1974-), 硕士研究生, 讲师. 研究方向为人工智能、信息系统安全.

唐俊 男, (1980-), 硕士研究生, 高级工程师, CCF 会员 (E20-0012235M). 研究方向为信息安全、仿生学算法、人工智能等.

(上接第 72 页)

参考文献:

- [1] Tierney J, Rader C M, Gold B. A digital frequency synthesizer[J]. IEEE Trans Audio Electroacoust, 1971 (19): 48-57.
- [2] 李海松, 张奇荣, 权海. DDS 的相位截断及相应的杂散信号分析[J]. 微电子学与计算机, 2006, 23(2): 141-143.
- [3] 马令坤, 张震强, 党宏社. DDS 频率合成器杂散的分析与仿真[J]. 微电子学与计算机, 2007, 24(7): 132-134.
- [4] 蔡剑华, 王先春, 胡惟文. DDS 杂散抑制技术的研究与实现[J]. 微电子学与计算机, 2009, 26(7): 127-133.
- [5] O'Leary, Maloberti P F. A direct-digital synthesizer with improved spectral performance[J]. IEEE Transac-

tions on Communications, 1991, 39: 1046-1048.

- [6] Nicholas H. Samueli T H. An analysis of the output spectrum of direct digital frequency synthesizers in the presence of phase-accumulator truncation[C]// 41st Annual Symposium on Frequency Control. Philadelphia: IEEE, 1987: 495-502.

作者简介:

沈志 男, (1983-), 博士研究生. 研究方向为现代通信信号处理和现代数字信号处理.

王宏远 男, (1946-), 教授, 博士生导师. 研究方向为图像通信、图像信号处理和现代数字信号处理.