

DDS 中几种关键的 ROM 压缩方法

孟玉洁,贾怀义,陶 成

(北京交通大学 电子信息工程学院, 北京 100044)

摘要:直接数字频率合成器(direct digital frequency synthesis,DDS)采用只读存储器(read only memory, ROM)来完成相位到幅度的映射,由于 DDS 的频谱纯度与 ROM 表的大小成正比,而增大 ROM,又会使系统功率消耗增大,稳定性降低。因此,为了既能满足信号的性能指标又能减少系统的开销,很多人开始寻求更好的 ROM 压缩方法。介绍了几种关键的 ROM 压缩方法并对其性能进行了比较。

关键词:DDS; 泰勒级数; ROM 压缩; 插值法

中图分类号:TP333.7

文献标识码:B

文章编号:1006-7442(2004)01-0037-03

0 引言

直接数字频率合成器(DDFS 或 DDS)因为具有频率分辨率高,频谱纯度高,输出频带范围大以及频率切换快等优点而在现代通信系统中得到越来越广泛的应用。其基本原理如图 1 所示。

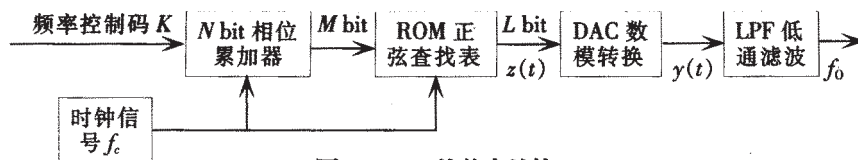


图1 DDS的基本结构

DDS 主要由相位累加器、只读存储器(ROM)、数模转换器(DAC)、低通平滑滤波器构成。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 进行相位-幅度变换,输出不同的幅度量化值,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 决定的连续变化输出波形。当触发时钟为 f_{clk} 时,DDS 输出的正弦信号频率分辨精度为 $f_{clk}/2^N$, 输出频率范围为 $f_{out}=f_{clk} \cdot K/$

2^N ,其中 K 为控制字,且 $K < 2^{N-1}$ 。

可以看出 DDS 的关键部分就是相幅转换,而根据实现相位到幅度映射的方式不同,DDS 可分为两大类:1)基于函数计算的方法,如 CORIDC 算法和抛物线近似法等。这类算法的优点是可以实现高

纯度的正弦信号,缺点是实现算法的逻辑电路复杂,从而限制了输出频带范围。2)基于查表法。这类方法是在 ROM 中存储完整的或者部分的正弦信号,相位累加器的输出作为读取 ROM 的地址信号。

此时,ROM 的地址位数 M 决定相位分辨精度,而 ROM 的样点位数 L 决定幅度的分辨精度。这一技术优点是实现比较容易,故 DDS 设计者大都采用这一技术。缺点是输出杂散比较大。为提高其性能指标,国内外学者提出了许多新技术及改进方案,已经得到了应用。下面就对各种改进方案进行了介绍,并通过仿真,比较各种方法的优劣。

1 几种关键的 ROM 压缩方法

1.1 基于信号对称的方法

一种 ROM 压缩的最简单方法是利用正弦信号或者余弦信号的对称性。由对称性可知,用之间的信号通过地址变换就能表示全部的正弦或者余弦信号。下面各种方法都是建立在信号对称的基础上进一步压缩 ROM 的。

作者简介

孟玉洁(1979-),女,北京交通大学2002届硕士研究生,专业为通信与信息系统。

贾怀义(1948-),男,教授,北京交通大学招生与就业处主任,研究方向是个人通信、无线通信。

1.2 三角近似法

这种方法是由 Sunderland^[1]提出的,如图 2 所示。

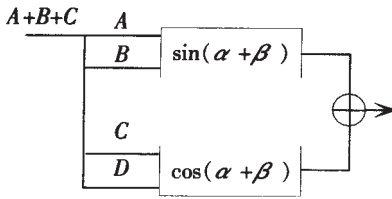


图 2 Sunderland 的 ROM 结构

通过采用两个更小的 ROM,大小分别为 2^{A+B} 和 2^{A+C} 来代替大小为 2^{A+B+C} 的 ROM。其中 A 、 B 、 C 分别为正弦函数相位的高几位、中间位和低几位,假设 A 、 B 、 C 表示的相角分别为 α 、 β 、 x ,则

$$\begin{aligned} \sin(\alpha + \beta + x) = & \sin(\alpha + \beta)\cos(x) + \\ & \cos(\alpha)\cos(\beta)\sin(x) - \\ & \sin(\alpha)\sin(\beta)\cos(x) \end{aligned} \quad (1)$$

由于 α 远大于 β 和 x ,则利用三角近似 $\cos(\beta) \approx 1$, $\sin(x) \approx 0$,式(1)可简化为 $\sin(\alpha + \beta + x) \approx \sin(\alpha + \beta) + \cos(\alpha)\sin(x)$ (2)

通过把式(2)的第一项存储在一个粗略的 ROM 表中,把第二项存储在一个精确的 ROM 表中来达到减少 ROM 存储空间的目的。但是这种技术必须在 ROM 表后附加一个加法器,把两个 ROM 表的结果相加而重构正弦函数。

Nicholas 等人对这种方法进行了改进,采用计算机近似法来代替三角近似法,即由计算机选取适当的采样点存储在 ROM 中达到进一步缩小 ROM 的目的。

1.3 基于泰勒级数的线性插值法

这种方法是由 Bellaouar 提出的一种新的映射技术,通过一个很小的查找表将相位 θ 变换到 $\sin(\theta)$ 。这种方法不但采用了正弦信号的对称性,还对存储在 ROM 中的连续点采用了线性插值法。对存储在粗略 ROM 中的相邻点,即每一个 (θ_i, θ_{i+1}) 间隔中的正弦函数均表示为

$$\begin{aligned} \sin(\theta) = & \sin(\theta_i) + \alpha(\varphi - \varphi_i) + \delta_{\sin} \\ & \theta \in [\theta_i, \theta_{i+1}] \end{aligned} \quad (3)$$

其中: $\theta = 2\pi\varphi/2^M$; θ_i 和 θ_{i+1} 是两个连续的存储相位; $\varphi - \varphi_i$ 表示相位累加器输出 φ 的最低有效位; φ_i 表示 ROM 地址的最高有效位; α 表示存储在 ROM 表中的正弦函数的插值系数,定义为 $2\pi \cos(\theta_i)/2^M$ 。在式(3)中, δ_{\sin} 是正弦函数的泰勒展开式余项,定义为

$$\delta_{\sin} = -\frac{1}{2} \sin \theta_s \cdot (\varphi - \varphi_i)^2 \quad (4)$$

其中, $\theta_s \in [\theta_i, \theta_{i+1}]$ 。由于正弦函数小于等于 1,因此式(4)等价于 $|\delta_{\sin}| = \left| \frac{1}{2}(\varphi - \varphi_i)^2 \right|$ 。记 $|\varphi - \varphi_i|_{\max} = |\theta_{i+1} - \theta_i| = h$,其中 h 是插值点之间的间隔,因此得到 $|\delta_{\sin}|_{\max} = h^2/2$ 。

例如,相位间隔在 $[0, \pi/4]$ 之间的 16 点的查找表, $h = (\pi/4)/16 = 0.049$,因此 $|\delta_{\sin}| = 1.2 \times 10^{-3}$,或者可以得到最大为 58 dB 的信噪比。

在此方法的基础上, Mohamed^[5]等人通过在查找表中存储 $\sin(2\pi\varphi/2^M) - \varphi/2^M$ 代替 $\sin(2\pi\varphi/2^M)$ 对上述方法进行了进一步改进,为存储在 ROM 表中的每个幅度值节省了两个比特。因为 $[\sin(2\pi\varphi/2^M) - \varphi/2^M]_{\max} = 0.21[\sin(2\pi\varphi/2^M)]_{\max}$ 。但是需在查找表后附加一个加法器来完成 $[\sin(2\pi\varphi/2^M) - \varphi/2^M] + \varphi/2^M$ 的操作。

1.4 线性插值法

已知相位幅度转换输出的幅度值为

$$f(x) = A \sin(\pi x/2) - \varepsilon(x), \quad 0 \leq x < 1 \quad (5)$$

其中: A 的幅度值小于等于 1; $\varepsilon(x)$ 是近似误差。假设正弦信号的幅度值是 L bit,则应该选择合理的幅度系数 A ,使合成器的输出幅度最大。一般 A 取 $(2^L - 1)/2^L$ 。线性插值法是采用如下等式完成相位幅度转换的,如式(6)所示,其中 $f(x)$ 为输出幅度值。

$$f(x) = \begin{cases} y_0 + m_0(x - x_0) & x_0 \leq x < x_1 \quad (x_0 = 0) \\ y_1 + m_1(x - x_1) & x_1 \leq x < x_2 \\ \dots & \dots \\ y_k + m_k(x - x_k) & x_k \leq x < x_{k+1} \\ y_{s-1} + m_{s-1}(x - x_{s-1}) & x_{s-1} \leq x < x_s \quad (x_0 = 0) \end{cases} \quad (6)$$

其中: s 是分段的个数; m_k 和 y_k 分别是各段的斜率和初始幅度值; x_k 是各段的下界。选择适当的分段个数和长度能够使式(6)大大简化。如果 s 的权值是 2,则 x 的最高有效位 $\log_2 s$ 表示分段个数 k ,并且可以直接对存储在查找表中的斜率和初始幅度值进行寻址。如果各个分段值相等,则 x 的最低有效位 $M - \log_2 s$ 表示 $x - x_k$ 的值,并且 $x_k = k/s$,各个分段的长度为 $1/s$ 。其用于相位幅度转换的结构如图 3 所示。

3 各种 ROM 压缩方法的比较

由图 1,假设 $N=20, M=12, L=8$,则 DDS 输出信号的最大频谱纯度为 -72.25 dBc。在产生 -72.25 dBc

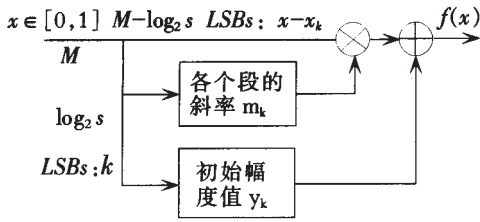


图 3 线性插值法用于相位幅度转换结构图

的频谱纯度条件下,各种 ROM 压缩方法的比较结果如表 1 所示。

表 1 N=20, M=12 条件下,各种 ROM 压缩方法比较

方法	所需 ROM 大小	ROM 压缩率	注释
压缩前	$2^{12} \times 8$	1:1	参考
利用波形对称性	$2^{10} \times 8$	4:1	-
Sunderland's 方法	$2^7 \times 8, 2^6 \times 3$	27:1	相位进行(3,4,3)分段,需要两个加法器
Nicholas's 方法	$2^6 \times 7, 2^6 \times 3$	51.2:1	相位进行(3,3,4)分段,需要两个加法器
Bellaouar's 方法	$2^5 \times 8, 2^5 \times 5$	78.8:1	相位进行(5,5)分段,需要一个乘法器,两个加法器
Mohamed's 方法	$2^5 \times 8, 2^5 \times 5$	128.8:1	相位进行(4,6)分段,需要一个乘法器,两个加法器
线性插值法	2^5	1 024:1	相位进行 32 分段,需要 32 个乘法器和一个加法器

由表 1 可知,随着 ROM 表压缩率的增加,系统的硬件设计复杂度也随之增加。因此,选取恰当的设计参数和 ROM 压缩技术,可以在满足要求的前提下,使系统的性能达到最优。

4 结论

如前所述,ROM 表的地址位数 L 决定了相位的分辨精度,因此 ROM 表的地址位数越大,DDS

输出频谱的纯度越高,色散就越小。而 ROM 表的大小跟 DDS 中数据的处理速度、DDS 的性能成反比。因此必须尽量压缩 ROM 表,同时又不能使硬件的设计复杂度过大。所以在设计 DDS 时,要选择适当的 ROM 压缩技术,使系统在满足总的性能指标的前提下,达到在 ROM 表的压缩和硬件的设计复杂度之间良好的折衷。

[参考文献]

- [1] Sunderland D, Strauch R. CMOS/SOS frequency synthesizer LSI circuit for spread spectrum communications[J]. IEEE J Solid State Circuits. 1984,(SC-19):497-505.
- [2] Nicholas H T. The optimization of direct digital frequency synthesizer performance in the presence of finite word length effects[A]. Proc. 42nd Annual Frequency Control Symp[C]357-363.
- [3] Bellaouar A. et al. Low-power direct digital frequency for wireless communications [J]. IEEE J Soli-State Circuits, 2000,35:385-390.
- [4] MEL Said Mohamed. An improved ROM compression technique for digital frequency synthesizers [A]. In: Proceeding of IEEE International Symposium on Circuits and Systems[C], 2002.
- [5] Langlois J M P, Al-Khalili D. Piecewise continuous linear interpolation of the sine function for direct digital frequency synthesis [J]. IEEE, 2003.

Some Key Methods of ROM Compression in the DDS

MENG Yu-jie, JIA Huai-yi, TAO Cheng

(Faculty of Electronics Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Direct Digital Frequency Synthesis (DDS) with Read Only Memory (ROM) performs functional mapping from phase to sine amplitude. The spectral purity of the conventional DDS is determined by the size of table ROM. Unfortunately, large ROM storage means high power consumption, lower reliability. In order to meet the total system performance's need and reduce the cost of system, many people begin to find the better methods of ROM compression. This paper described some key methods of ROM compression and compared their performance.

Key words: DDS; taylor-series; ROM compression; linear interpolation