One Technology Way • P.O. Box 9106 • Norwood, MA 02062-9106, U.S.A. • Tel: 781.329.4700 • Fax: 781.461.3113 • www.analog.com

数字正交调制器增益

作者：Ken Gentile

简介

数字正交调制器出现在众多通信及信号处理IC中。本应用笔记旨在说明数字正交调制器的基本构建模块，并分析三类输入信号在调制器中产生的增益。

普通数字调制器由一对数字乘法器和一个数字加法器构成，如图1所示。一般地，与数据路径相关的二进制数字都有着相同的数字范围，即±1。这种情况适用于输入(I、Q和载波)、输出(Y)以及中间数字路径。出于一般性考虑，图中所示总线宽度为N位，代表−1与+1之间的小数值。

在四个输入端中，有两个专门用于处理数字载波信号，这是构成正交载波的正弦波和余弦波的N位量化表示。根据定义，载波拥有独立的正弦和余弦分量，二者均以载波角频率ω_C振荡(数字式)(其中，ω_C等于$2\pi f_C$，f_C表示单位时间周期数)。另外两个输入端(I和Q)用于处理一个N位量化数字基带信号。I和Q这两个分别是基带信号中的同相(in-phase)和正交(quadrature)相位分量的缩写。输出端Y是上变频至载波频率(f_C)的基带信号的N位量化数字表示。

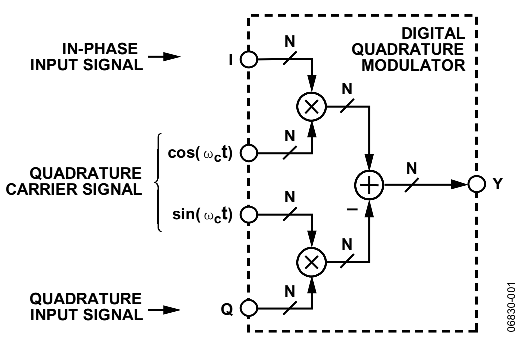

图1. 数字正交调制器功能框图

输入信号与输出信号之间的关系可以表示为一个时间函数，如等式1所示。

$$Y(t) = \frac{1}{2}[I(t)\cos(\omega_C t) - Q(t)\sin(\omega_C t)] \quad (1)$$

根据定义，载波信号与时间有关，如正弦函数和余弦函数自变量中的t项所示。Y、I和Q项也都有相应的t项，表示其值也与时间相关。将比例因子确定为½是在加法器的输入端和输出端使用相同位数的结果。其原因在于，两个N位乘法器输出之和实际要求N+1位表示全部结果之和。然而，将加法器输出限制为N位意味着，必须放弃N+1位结果中的最低有效位。截断成N位必然会使加法器位数丢失50%，这就是等式1中比例因子确立为½的原因所在。

接下来分析三类不同I及Q输入信号下的输出信号Y(t)。涉及的输入信号类型为

- 静态输入信号
- 非正交正弦输入信号
- 正交正弦输入信号

以下分析使用了等式2和等式3确立的三角恒等式。另外，等式4中的公式可用于正交信号分析。该等式将正交表达式(左侧)与余弦函数(右侧)相关联。尤其需要注意的是，当将等式4代入等式1时，结果会得到Y(t)的等价形式，如等式5所示。

$$\cos(x)\cos(y) = \frac{1}{2}\cos(x+y) + \frac{1}{2}\cos(x-y) \quad (2)$$

$$\sin(x)\sin(y) = \frac{1}{2}\cos(x-y) - \frac{1}{2}\cos(x+y) \quad (3)$$

$$A\cos(x) \pm B\sin(x) = \sqrt{A^2+B^2}\cos\left[x \mp \arctan\left(\frac{B}{A}\right)\right] \quad (4)$$

$$Y(t) = \frac{1}{2}\sqrt{I(t)^2+Q(t)^2}\cos\left[\omega_C t + \arctan\left(\frac{Q(t)}{I(t)}\right)\right] \quad (5)$$

静态输入信号分析：

I(t)=D且Q(t)=E

这种情况下，输入信号I和Q与时间无关，而分别是D和E产生的静态值。D和E被设为0与1之间的小数值(含0和1)，即二者代表最大可能峰值输入值的小数部分。据等式5，Y(t)可表示为

$$Y(t) = \frac{1}{2}\sqrt{D^2 + E^2}\cos\left[\omega_C t + \arctan\left(\frac{E}{D}\right)\right] \tag{6}$$

注意，等式6中余弦函数的自变量只含有一个频率分量(ωc)。即是说，输出信号是具有与载波信号相同频率的单音。但输出信号的相位随弧度角arctan(E/D)而增加，对应着正交载波输入信号中余弦分量的相位。另外，输出信号的幅度取决于D和E的矢量和。在D等于E的特殊情况下(即D = E = k (0 ≤ k ≤ 1))，Y(t)可简化为

$$Y(t) = \frac{k\sqrt{2}}{2}\cos\left(\omega_C t + \frac{\pi}{4}\right) \tag{7}$$

可考虑k = 1的特殊情况，即I和Q输入为静态满量程值。当k=1时，Y(t)的峰值为√2/2，表示在最大可能峰值输出值为1时，增益为-3dB。归一化输出功率为$(\sqrt{2}/2)^2$=½，或者说在最大可能输出功率(1)2=1时，增益为-3dB。

非正交正弦输入信号分析：

I(t)=A×cos(ω_Bt)且Q(t)=B×cos(ω_Bt)

这种情况下，输入信号I和Q为正弦信号。两个正弦信号都具有任意基带角频率ω_B，无相对相位偏移(即两个信号为同相)。另外，信号I由常数A(0≤A≤1)进行缩放，信号Q则由常数B(0≤B≤1)缩放。据等式5，输出信号可表示为

$$Y(t) = \frac{1}{2}\sqrt{A^2\cos^2(\omega_B t) + B^2\cos^2(\omega_B t)} \times \cos\left[\omega_C t + \arctan\left(\frac{B\cos(\omega_B t)}{A\cos(\omega_B t)}\right)\right] \tag{8}$$

简化为

$$Y(t) = \frac{\sqrt{A^2 + B^2}}{2}\cos(\omega_c t + \theta)\cos(\omega_B t) \tag{9}$$

注意，与静态输入信号类似，载波表现出恒定相移，公式为θ = arctan(B/A)。

将等式2代入等式9中的Y(t)，则有

$$Y(t) = \frac{\sqrt{A^2 + B^2}}{4} \times \left\{\cos\left[(\omega_C + \omega_B)t + \theta\right] + \cos\left[(\omega_C - \omega_B)t + \theta\right]\right\} \tag{10}$$

注意，Y(t)由两个余弦函数构成。其中之一包含角频率项$\omega_C+\omega_B$，另一个包含角频率$\omega_C-\omega_B$；但两者都表现出θ =arctan(B/A)的相移。可见，Y(t)由两个信号音构成，二者均为基带频率(f_B)偏移载波频率(f_C)。此外，各信号音的振幅缩放量为：

$$\sqrt{A^2 + B^2}/4 \tag{11}$$

可考虑A = B = 1的情况，即信号I和Q的峰值为满量程输入范围的极值。此时，各输出信号音的峰值变为√2/4，相位偏移(θ)则为π/4弧度。各输出信号音的峰值为√2/4意味着当最大可能峰值输出值为1时，增益为−9 dB。但是，两个信号音处于不同的频率，意即其复合振幅的峰值相当于任一信号音的两倍(与θ值无关)。因此，Y(t)的峰值振幅为2(√2/4) = √2/2，表示在最大可能峰值输出值为1时，增益为−3 dB。

每个信号音的归一化功率为(√2/4)2=⅛。由于总功率等于各信号音功率之和，因此总功率为¼。结果，相对于最大可能输出功率(1)2=1(峰值为1的单个正弦波的功率)，Y(t)的功率损失为6 dB。

注意，如果用正弦函数代替输入信号，结果与此处的结果相同，唯一区别是Y(t)含有正弦函数。

正交正弦输入信号分析：

I(t)=A×cos(ω_Bt)且Q(t)=B×sin(ω_Bt)

这种情况下，输入信号I和Q构成一个正交信号音（分别为余弦函数和正弦函数），其基带角频率为ωB。信号I由A(0≤A≤1)进行缩放，信号Q则由B(0≤B≤1)缩放。据等式1，Y(t)可表示为

$$Y(t) = \frac{AB}{2}\left[\cos(\omega_C t)\cos(\omega_B t) - \sin(\omega_C t)\sin(\omega_B t)\right] \tag{12}$$

将等式2和等式3代入等式12中的Y(t)，该等式可简化为

$$Y(t) = \frac{AB}{2}\cos\left[(\omega_C + \omega_B)t\right] \tag{13}$$

注意，Y(t)仅含有一个余弦项，即是说Y(t)由单个信号音构

成。其角频率为基带角频率(ω_B)与载波角频率(ω_C)之和，且信号音的振幅由½AB比例放大。

可考虑A = B = 1的情况，即信号I和Q的峰值均为满量程输入范围的极值。此时，Y(t)为

$$Y(t)=\frac{1}{2}\cos[(\omega_C+\omega_B)t] \tag{14}$$

注意，单个信号音输出的峰值振幅为½，表示在最大可能峰值输出值为1时，增益为−6dB。归一化输出功率为(½)2=¼，表示在最大可能输出功率(1)2=1的时候，功率损失为6dB。

固有衰减

以上各节显示，N位数字正交调制器表现出一种固有衰减，取决于I、Q两个输入端的信号类型。三类输入信号的衰减因子如下所示：

- 静态：−3dB
- 非正交信号音：−3dB复合(各信号音−9dB)
- 正交信号音：-6dB

对于数字正交调制器的固有衰减，可以通过在调制器输出端添加一个数字乘法器来加以克服。该乘法器充当一个放大器，用于补偿调制器的固有衰减。在不发生数字溢出的情况下允许的放大量取决于I、Q两个输入信号的振幅。然而，对于满量程I、Q输入信号，必须对放大因子进行上限限制，以避免数字溢出。当输入信号为正交信号音时，放大因子必须限制为2.0(或6dB)。当输入信号为非正交信号音或静态值时，放大因子必须限制为1.414(或3dB)。

固有功率损失

N位数字正交调制器的固有衰减会导致与满量程N位正弦信号音相关的信号功率损失。功率损失程度取决于施加于I、Q两个输入端的信号类型。三类输入信号的相对输出功率如下所示：

- 静态：−3dB
- 非正交信号音：-6dB复合(各信号音−9 dB)
- 正交信号音：-6 dB

当调制器驱动DAC且频谱分析仪连接至DAC输出端以测量信号功率时，与不同输入信号相关的功率损失较为明显(见图2)。由于调制器有一个N位输出端，因此其基准功率为N位量化正弦信号音的基准功率。此类信号音用频谱分析仪测得的功率水平用作以下讨论的基准水平，表示为0 dBr。

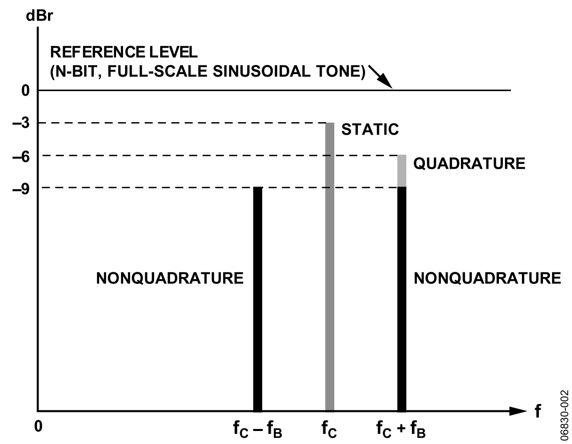

图2. 相对功率谱

当用N位数字调制器驱动N位DAC(如图1所示)时，输出功率取决于I、Q输入端的信号类型。具体地说，当调制器的I、Q两个输入端由满量程静态输入信号驱动时，DAC输出单音，载波频率为(fC)，输出功率水平为−3dBr。当调制器的I、Q两个输入端由满量程正交信号音驱动时，DAC输出单音，频率为fC+fB，输出功率水平为-6dBr。当调制器的I、Q两个输入端由满量程非正交信号音驱动时，DAC输出信号由两个频率(fC±fB)构成，各信号音的输出功率水平均为-9 dBr。复合信号功率(两个信号音复合)为−6 dBr，为任一输出信号音功率的两倍。

注释