

## 有意为之的非线性DAC

作者: Walt Kester

### 简介

通常,我们都是在强调数据转换器中保持良好微分和积分线性度的重要性。不过,在一些情况下,有意为之的非线性ADC和DAC(但保持良好的微分线性度)会非常有用,尤其是在处理具有宽动态范围的信号时。

### 非线性DAC和ADC的电信应用

非线性数据转换器的最早用途之一是对脉冲码调制(PCM)系统的语音频带信号进行数字化处理。在研发T1载波系统过程中,贝尔实验室做出了巨大贡献。使用非线性ADC和DAC的动机是为了减少对语音通道进行数字化处理所需的总位数,从而降低串行传输速率。直接对语音通道进行线性编码需要11或12位,且采样速率为8 kSPS。上世纪60年代,贝尔实验室确定7位非线性编码就已够用;之后在70年代,他们转而采用8位非线性编码来改善性能(参考文献1-6)。

在总的范围内,非线性传递函数针对小信号分配的量化级数较多,而针对大幅度信号则较少。实际上,这样可以减少与小信号相关的量化噪声(噪声影响最为显著),并增加较大信号的量化噪声(噪声影响最不明显)。通常使用“压缩扩展”这一术语来描述此种编码形式。

选定的对数传递函数称作“Bell  $\mu$ -255”标准,或者就是“ $\mu$ 法则”。欧洲制定有一项类似标准,称为“A法则”。Bell  $\mu$ 法则支持通过8位实现约4000:1的动态范围,而8位线性数据转换仅提供256:1的范围。

在发射器中,第一代通道分组(D1)使用以温度控制的电阻二极管网络作为7位线性ADC之前的“压缩器”来产生对数传递函数。在接收器中,7位线性DAC后接具有反向传递函数的相应电阻二极管“扩展器”。下一代D2通道分组采用非线性ADC和DAC,以一种更可靠、更具成本效益的方式来实现压缩/扩展功能,并且无需温度控制二极管网络。

B. D. Smith在其1953年发表的经典论文中提出,当反馈路径中使用非线性内部DAC时,逐次逼近型ADC的传递函数是该DAC的反向传递函数(参考文献7)。因此,相同的基本DAC可以用于ADC中,也可以用于重构DAC。上世纪60年代末期和70年代早期,非线性ADC和DAC技术通过采用分段线性逼近法获得所需传递函数,实现了低成本、大规模使用(参考文献1-6)。这些非线性8位、8 kSPS数据转换器已经成为常见的电信构建模块。

8位DAC的非线性传递函数首先分为16个具有不同斜率的段(弦)，具体斜率取决于所需的非线性传递函数。4 MSB决定包含所需数据点的段，而每个段又进一步由8位字的4 LSB细分成16个相等的量化级。图1显示了6位DAC的情况，其中前3位确定8个可能弦之一，而每个弦又进一步根据3 LSB的定义细分成8个相等的等级。3 MSB通过使用非线性串DAC产生，而3 LSB则使用3位二进制R-2R DAC产生。

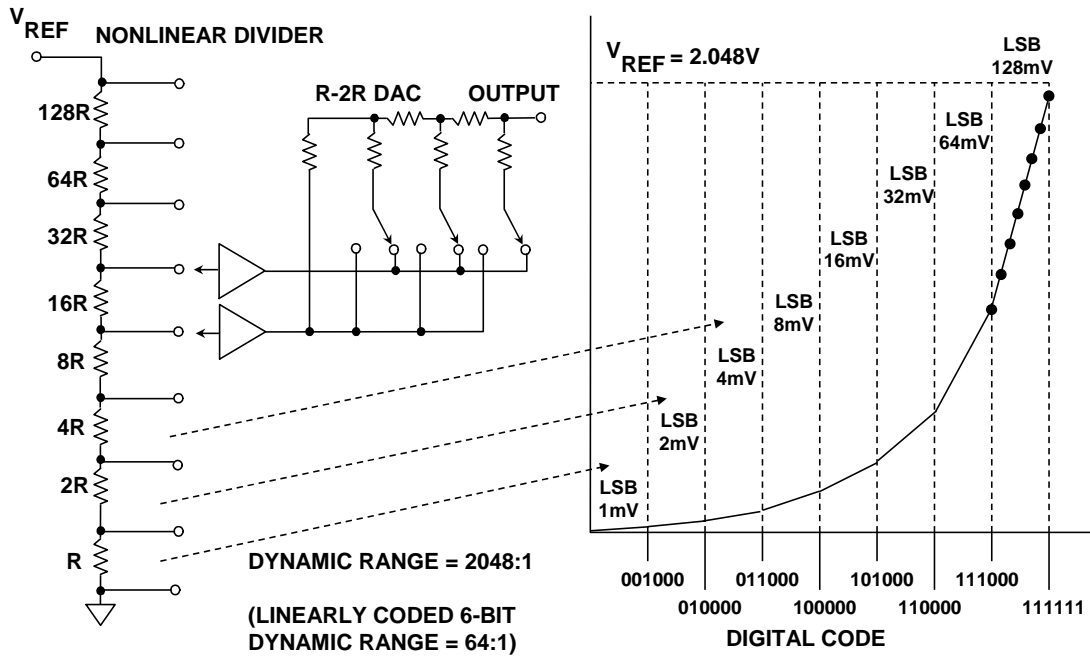


图1：非线性6位分段DAC

1982年，ADI公司推出了LOGDAC® [AD7111](#)单芯片乘法DAC，该芯片使用对数传递函数，具有宽动态范围。LOGDAC中的基础DAC是一种其前配有8位输入解码器的17位电流模式线性“反转”R-2R DAC(见图2)。LOGDAC能以0.375 dB步进，在0 dB至88.5 dB范围内对模拟输入信号 $V_{IN}$ 进行衰减。DAC上的衰减程度由作用于片内解码逻辑的非线性编码8位字决定。这个8位字先映射成相应的17位字，然后作用于一个17位R-2R梯形电阻。LOGDAC的功能框图如图2所示。除提供对数传递函数之外，LOGDAC还用作全四象限乘法DAC。

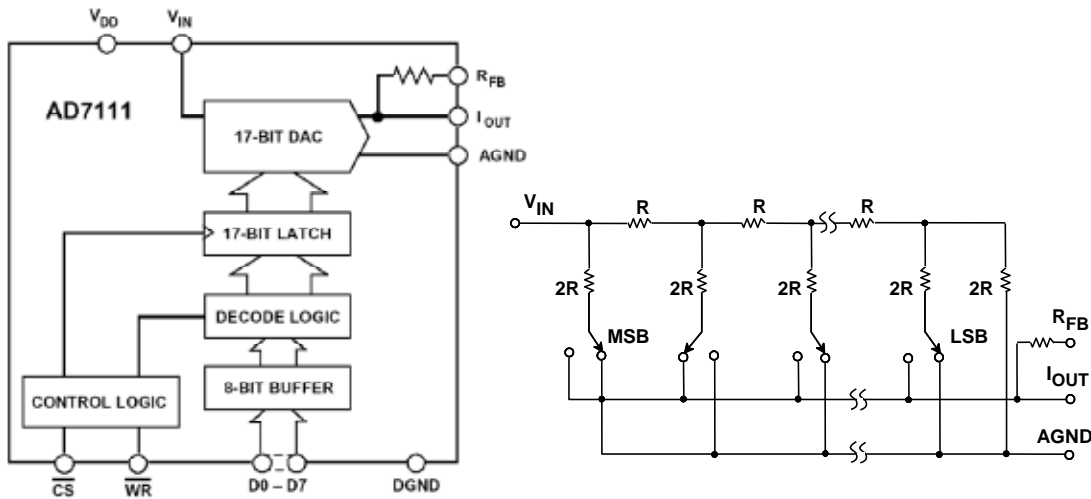


图2: [AD7111 LOGDAC<sup>®</sup>](#) (1982年发布)

随着高分辨率线性ADC和DAC的推出，LOGDAC<sup>®</sup>中采用的方法现已广泛用于实施各种非线性传递函数，如电信及其它应用中所需的 $\mu$ 法则和A法则压缩扩展函数。图3所示为现代方法的通用框图。

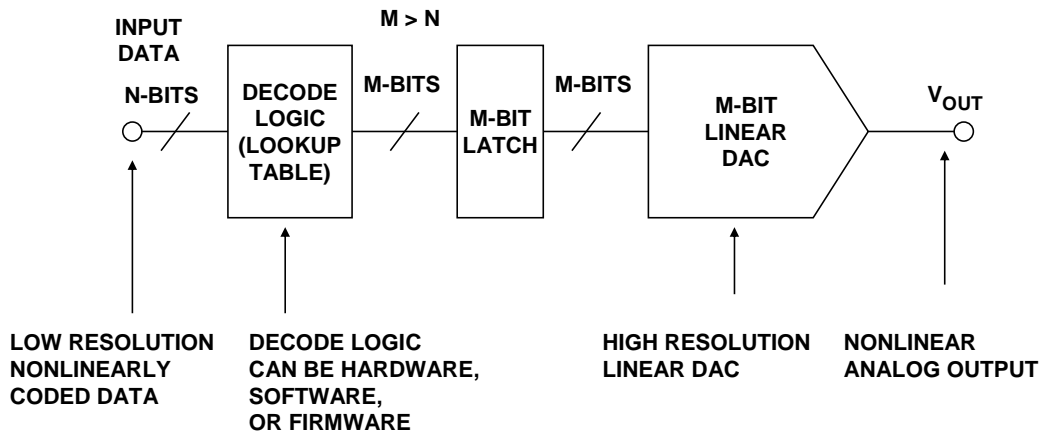


图3: 通用非线性DAC

以 $\mu$ 法则或A法则压缩扩展的输入数据映射成高分辨率DAC传递函数上的数据点。这种映射可以通过硬件、软件或固件中的简易查找表来轻松实现。通过使用高分辨率ADC对模拟输入信号进行数字化处理，然后使用合适的传递函数将数据点映射到较短字，可以构建出类似的非线性ADC。这种方法的一项巨大优势在于，无需与以前方法一样使用直线线段对传递曲线进行近似处理，因而精度更高。

## 参考文献

1. B. Smith, "Instantaneous Companding of Quantized Signals, *Bell System Technical Journal*, Vol. 36, May 1957, pp. 653-709. (*one of the first papers written about using nonlinear coding techniques for speech signals in PCM*).
2. H. Kaneko and T. Sekimoto, "Logarithmic PCM Encoding Without Diode Compandor," *IEEE Transactions on Communications Systems*, Vol. 11, No. 3, September 1963, pp. 296-307. (*describes several methods for nonlinear encoding speech directly without the need for diode compandors*).
3. C. L. Dammann, "An Approach to Logarithmic Coders and Decoders," *NEREM Record*, Boston MA, November 2-4, 1966, pp. 196-197. (*more discussions on nonlinear coders and decoders for PCM*).
4. H. Kaneko, "A Unified Formulation of Segment Companding Laws and Synthesis of Codecs and Digital Compandors," *Bell System Technical Journal*, Vol. 49, September 1970, pp. 1555-1558. (*discusses the piecewise linear approximation to the logarithmic transfer companding function*).
5. M. R. Aaron and H. Kaneko, "Synthesis of Digital Attenuators for Segment Companded PCM Codes," *Transactions on Communications Technology*, COM-19, December 1971, pp. 1076-1087. (*more on nonlinear coding*).
6. C. L. Dammann, L. D. McDaniel, and C. L. Maddox, "D2 Channel Bank: Multiplexing and Coding," *Bell System Technical Journal*, Vol. 51, October 1972, pp. 1675-1699. (*still more on nonlinear coding*).
7. B. D. Smith, "Coding by Feedback Methods," *Proceedings of the I. R. E.*, Vol. 41, August 1953, pp. 1053-1058. (*Smith uses an internal binary weighted DAC and also points out that a non-linear transfer function can be achieved by using a DAC with non-uniform bit weights, a technique which is widely used in today's voiceband ADCs with built-in companding. He was also one of the first to propose using an R/2R ladder network within the DAC core*).
8. Walt Kester, [Analog-Digital Conversion](#), Analog Devices, 2004, ISBN 0-916550-27-3, Chapter 3. Also available as [The Data Conversion Handbook](#), Elsevier/Newnes, 2005, ISBN 0-7506-7841-0, Chapter 3.

Copyright 2009, Analog Devices, Inc. All rights reserved. Analog Devices assumes no responsibility for customer product design or the use or application of customers' products or for any infringements of patents or rights of others which may result from Analog Devices assistance. All trademarks and logos are property of their respective holders. Information furnished by Analog Devices applications and development tools engineers is believed to be accurate and reliable, however no responsibility is assumed by Analog Devices regarding technical accuracy and topicality of the content provided in Analog Devices Tutorials.