

$\Sigma\Delta$ 调制器中非线性直流增益建模

廖鹏飞¹, 庄圣贤², 秦 伟¹

(1 西南交通大学 信息科学与技术学院, 四川 成都 610031; 2 西南交通大学 电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘 要: 分析了运算放大器有限直流增益和非线性直流增益对 $\Sigma\Delta$ 调制器的影响, 通过双曲正切函数模拟运算放大器的输入输出特性, 由积分器的递归解法构造了一个调制器模型. 该模型可用于系统级仿真来预测非线性直流增益对调制器性能的影响, 系统级仿真和电路级仿真证明此模型行之有效.

关键词: $\Sigma\Delta$ 调制器; 双曲正切; 递归解法; 非线性直流增益

中图分类号: TN4

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2010)02-0119-03

The Nonlinear DC-gain Model in $\Sigma\Delta$ Modulators

LIAO Peng-fei¹, ZHUANG Sheng-xian², QIN Wei¹

(1 School of Information Science & Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2 School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: The effects of the op-amps' Nonlinear DC-gain on Delta-Sigma ($\Sigma\Delta$) modulators is studied in this paper. A system-level model consists of a hyperbolic tangent model for the input/output characteristic of op amps and a recursive solution of nonlinear integrators. The proposed model can simply be used to evaluate the effect of amplifier's DC-gain non-linearity. Simulations at different levels of abstraction indicate the accurateness of this model.

Key words: $\Sigma\Delta$ modulators; hyperbolic tangent; recursive solution; nonlinear DC-gain

1 引言

在当今的 DSP 系统中, 作为联系模拟世界与强大的数字领域的桥梁, ADC 扮演了重要的角色^[1]. $\Sigma\Delta$ ADC 很好的这折衷了转换器的速度和精度, 采用了过采样和噪声整形技术, 可以在较低的量化器精度下实现很高的分辨率, 且有效的减小了电路对元器件匹配精度的要求^[2]. 该调制器可以采用主流的 VLSI 工艺实现, 可以实现电路与数字处理系统的单片集成, 因此成为用于通信系统中 ADC 的极佳选择.

为了获得要求的信噪比, 通常需要对调制器的参数进行优化. 如增益因子和级间耦合因子, 由于 $\Sigma\Delta$ 调制器的非线性, 优化过程需要进行行为级仿真^[3], 因此在 matlab/simulink 下包括了采样时钟抖动, 开关噪声, 放大器的有限增益, 压摆率等非理想因素的行为级模型便应运而生, 并通过仿真验证噪

声模型的正确性. 但是放大器的非线性直流增益在开关电容电路中也会导致失真, 随着低压低功耗的趋势化, 放大器增益也随之变小, 非线性直流增益对调制器的影响更大, 这一点文献中鲜有讨论^[4].

文中通过一个双曲正切函数模拟运算放大器的输入输出特性介绍了一种既简单又精确的调制器模型, 用于模拟非线性直流增益对调制器性能的影响. 和传统的噪声模型相比, 更能精确的预测调制器的非理想特性, 仿真所需时间是电路级仿真时间的十分之一.

2 直流增益对调制器的影响

积分器在 Z 域下的传输函数为^[4]:

$$H(z) = \frac{C_s}{C_i} \cdot \frac{(1 - \xi_1)z^{-1}}{1 - (1 - \xi_2)z^{-1}} \quad (1)$$

$$\xi_1 = \frac{C_s + C_i}{(A + 1)C_i + C_s} = \frac{g + 1}{A + g + 1}$$

$$\xi_2 = \frac{C_s}{(A+1)C_i + C_s} = \frac{g}{A+g+1} \quad (2)$$

其中, C_s 为采样电容, C_i 为积分电容. g 为理想积分器的直流增益. A 为放大器的直流增益, ξ_1 、 ξ_2 分别是增益极点误差. 理想积分器 ($A \rightarrow \infty$) 传输函数变为^[5]:

$$H(z) = \frac{gz^{-1}}{1-z^{-1}} \quad (3)$$

由此可见, 放大器的有限增益使积分器的直流增益产生泄露而降低, 极点偏离原点, 改变了传输函数, 增加了带内噪声. 更为严重的, A 并非为一固定值, 而是关于 V_o (V_i) 的偶函数, 这将在输出将产生奇次谐波^[6]. A 与运算放大器的输入关系如图 1 所示.

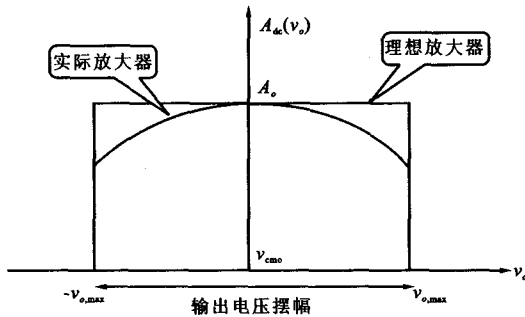


图 1 直流增益随输出的变化曲线

如何找到一个函数来近似 $A = f(V_o)$ 成为构建非线性直流增益对调制器性能影响的关键. 经发现, $v_o = a \tanh(bv_{in} - v_{cmo})$ 能很好的近似放大器的传输函数, 一个典型的两级放大器传输曲线和 $v_o = a \tanh(bv_{in} - v_{cmo})$ 的误差如图 2 所示.

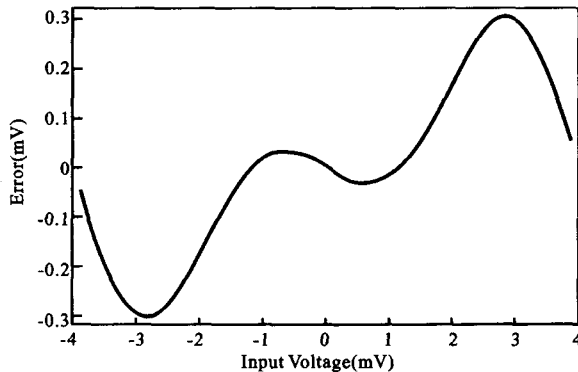


图 2 运算放大器传输曲线和 tanh 函数误差曲线

$$\begin{aligned} A_{dc} &= \frac{d(v_o)}{d(v_{in})} = ab(1 - \tanh(bv_{in} - v_{ino})^2) \\ &= ab(1 - \frac{v_o^2}{a^2}) = b(a - \frac{v_o^2}{a}) \end{aligned} \quad (4)$$

由上式可知, A_{dc} 是关于 V_o 的偶函数, 满足前

面的要求.

其中 $v_o = a \tanh(bv_{in} - v_{ino})$ 中系数 a, b 的确定方法如下:

$$\begin{cases} ab = \frac{d(v_o)}{d(v_{in})} \Big|_{v_{in}=v_{ino}} \\ a \tanh(\pm bv_{in,max} - v_{ino}) = f(\pm v_{in,max}) \end{cases} \quad (5)$$

构造一个非常精确的非线性直流增益关于 v_o 的函数是很困难的, 因为 v_o 本身又是关于 A_{dc} 的函数, 一般地, A_{dc} 关于 v_o 的函数可以非常近似由下式表示:

$$A_{dc}(v_o) = A_o(1 - \frac{(v_o - v_{cmo})^2}{v_{o,max}^2}) \quad (6)$$

其中, v_o 是关于 A 的函数.

对于延迟积分器

$$v_o = (1 - \xi_2)v_o[n-1] + g(1 - \xi_1)v_{in}[n-1] \quad (7)$$

对于非延迟积分器:

$$v_o = (1 - \xi_2)v_o[n-1] + g(1 - \xi_1)v_{in} \quad (8)$$

由此可得延迟积分器和非延迟积分器包含非线性直流增益的行为级模型. 将(7)和(8)带入(6)得到:

$$A_{dc}(v_o) = A_o \{ 1 - \frac{1}{v_{o,max}^2} [(1 - \xi_2)v_o[n-1] + g(1 - \xi_1)v_{in}[n-1] - v_{cmo}]^2 \} \quad (9)$$

$$A_{dc}(v_o) = A_o \{ 1 - \frac{1}{v_{o,max}^2} [(1 - \xi_2)v_o[n-1] + g(1 - \xi_1)v_{in} - v_{cmo}]^2 \} \quad (10)$$

将式(9)、(10)带入式(2)可构建带有非线性直流增益的延迟(非延迟)积分器模型, 如图 3、图 4 所示.

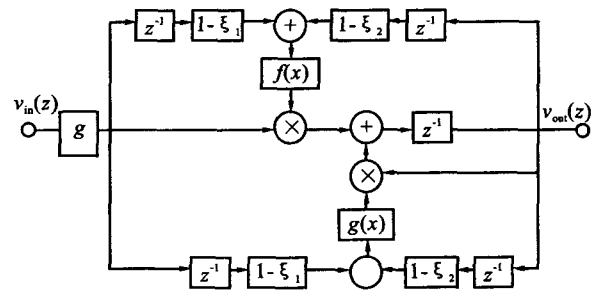


图 3 延迟积分器模型

其中:

$$f(x) = \frac{A_o(1 - \frac{(x - v_{cmo})^2}{v_{o,max}^2})}{A_o(1 - \frac{(x - v_{cmo})^2}{v_{o,max}^2}) + g + 1}$$

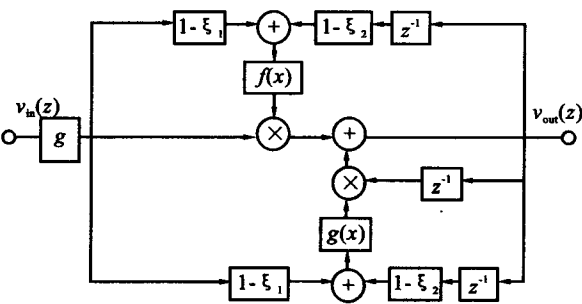


图4 非延迟积分器模型

$$= 1 - \xi'_1 \tag{11}$$

$$g(x) = \frac{A_o(1 - \frac{(x - v_{cmo})^2}{v_{o,max}^2}) + 1}{A_o(1 - \frac{(x - v_{cmo})^2}{v_{o,max}^2}) + g + 1}$$
$$= 1 - \xi'_2 \tag{12}$$

可见在所给模型中,增益极点误差由原来的 ξ_1, ξ_2 变为 ξ'_1, ξ'_2 .很明显 ξ'_1, ξ'_2 比 ξ_1, ξ_2 更小更准确,更能反映运算放大器直流增益对积分器传输函数零极点的影响.

3 仿真结果

为了验证上述模型能否精确的模拟放大器的非线性直流增益对调制器的影响,在simulink下利用上述模型构建了一个低通二阶调制器(只考虑非线性直流增益因素),其中只考虑了第一级积分器的非理想特性.结构和其功率谱密度如图5、图6所示.由图可知,非线性直流增益引入了奇次谐波,同时增加带内噪声,其SNDR=47.7dB.

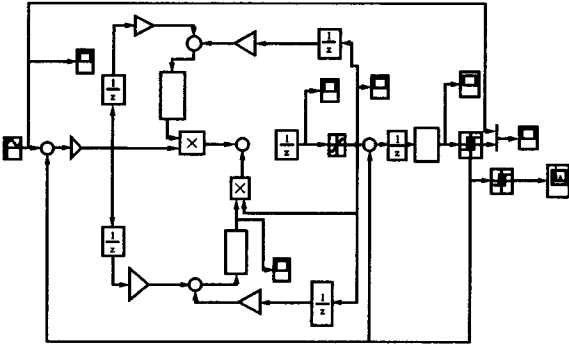


图5 二阶低通调制器结构

在simulink下分别构建了一个理想的和一个考虑了有限固定直流增益的模型,比较结果如表1所示.

为验证所给模型的正确性,在Hspice下构建一个二阶低通调制器(只考虑非线性直流增益),在0~50MHz做快速FFT,输出频谱如图7所示.经计

算,其SNDR=47.3dB,如图7所示.和所给模型仿真结果仅仅相差0.4dB,所需时间仅是电路级仿真的十分之一.

表1 几种常用模型仿真结果

仿真结构	SNDR(DB)	ENOB
理想模型	50.5	8.10
固定直流增益模型	49.6	7.94
非线性直流增益模型	47.7	7.63
电路级仿真 (基于Hspice0.18μm CMOS工艺)	47.3	7.56

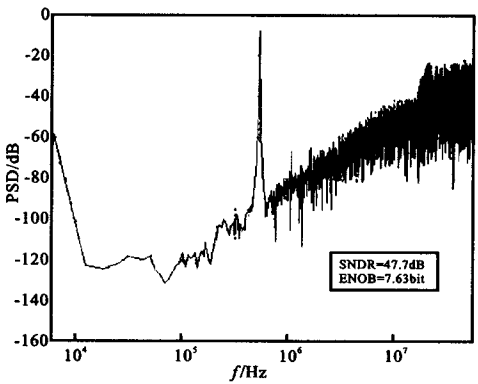


图6 调制器输出功率谱密度

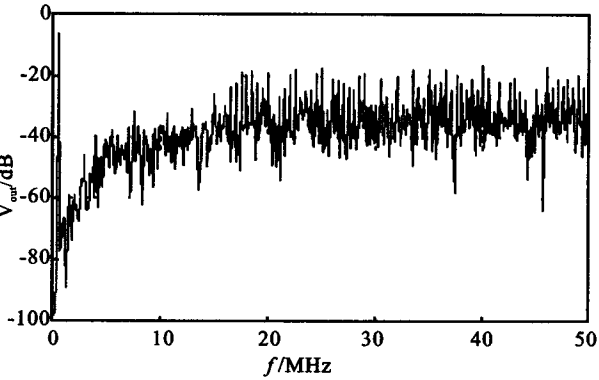


图7 Hspice下输出频谱

4 结束语

文中通过双曲正切函数来模拟放大器的传输曲线,进而构建一个简单精确的模型,能很准确的预测非线性直流增益对调制器的影响.电路级仿真证明此模型简单有效.和普通的考虑了放大器有限增益的模型相比更加准确,和电路级的仿真相比,误差大大缩小,时间仅是它的十分之一.

(下转第125页)

与非边缘处的像素采取不同的处理方法,有效保护了图像的边缘信息,避免了明显的平滑效应.采用了不同于常用的对于所有像素使用统一的处理方法进行图像放大的方法.以后的研究应当进一步考虑如何获取更精确与更符合实用的边缘位置等信息,使放大后的图像在边缘得到较好保持的基础上视觉效果更自然,光滑性更好.

参考文献:

- [1] 吴均,朱重光.带锐度保持的斜投影样条图像缩放[J].遥感学报,2002,6(2):108-112.
- [2] Niu Wei, Guo Bamlong. A new image magnification algorithm based on fractal interpolation and wavelet transform [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2004, 25(4): 351-354.
- [3] Nira S, Hagit A S, Ilan S, et al. Adaptive low complexity algorithm for image zooming at fractional scaling ratio[C]// 21st Convention of the Electrical and Electronic Engineers. Israel: IEEE, 2000: 253-256.
- [4] 尤玉虎,周晓宽.数字图像最佳插值算法研究[J].中国空间科学技术,2005(3):14-18.
- [5] 张义顺,郭彦辉,刘丽丽,等.一种高效的图像细化算法在焊缝跟踪中的应用[J].沈阳工业大学学报,2007,29(5):519-523.
- [6] 谭郁松,周兴铭.保持连通的边缘细化算法[J].国防科技大学学报,2004,26(4):51-56.

作者简介:

王东鹤 男,(1983-),博士.研究方向为目标检测、目标识别.

(上接第121页)

参考文献:

- [1] Northworthy S R, Schreier R, Temes G. Deltasigma data converters: theory, design and simulation [M]. Piscataway, USA: IEEE Press, 1996: 193-199.
- [2] Northworthy S R, Schreier R, Temes G C. Delta-sigma data converters[M]. Piscataway, IEEE Press, 1997.
- [3] Malcovati P. Behavioral modeling of switched-capacitor sigma-delta modulators[J]. IEEE Trans. Circuits Syst., 2003, 50(3): 352-364.
- [4] Zare-Hoseini H. Modeling of switched-capacitor delta-sigma modulators in SIMULINK[J]. IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, 2005, 54(4): 1646-1654.
- [5] Boser B E, Wooley B A. The design of sigma-delta modulation analog-to-digital converters[J]. IEEE J. of Solid State Circuits, 1988(SC-22): 1298-1308.
- [6] Abdelfattah K, Razavi B. Modeling op amp nonlinearity in switched-capacitor sigma-delta modulators[C]// Custom Integrated Circuits Conference. San Jose, 2006: 197-200.

作者简介:

廖鹏飞 男,(1984-),硕士研究生.研究方向为 $\Sigma\Delta$ 调制器设计.

庄圣贤 男,教授,博士生导师.研究方向为模拟及混合信号集成电路设计.

秦伟 男,硕士研究生.研究方向为集成电路设计.