

SAR ADC 中高效电荷均值开关方法

王浩, 钟伦贵, 谢文明, 郑少烽

(福建工程学院 信息科学与工程学院, 福建 福州 350118)

摘要: 提出一种逐次逼近型模数转换器 (successive approximation register analog-to-digital converter, SAR ADC) 高效电荷均值开关方法。该方法能够提供恒定的共模电压 V_{CM} , 大小为 V_{REF} 的一半, 且只需要使用两个参考电压 V_{REF} 和地, 避免了额外的电压基准电路。为了增加一位精度并保持恒定的共模电压, C-2C 结构替代参考电容 C。与单调开关方法相比, 该方法能耗减少 66.65%, 电容面积减少 49.41%。行为仿真结果证明了该方法的有效性。

关键词: 高效; 电荷均值; 开关方法; SAR ADC

中图分类号: TN43

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2017)03-0285-04

Energy-efficient charge-average capacitor switching scheme for SAR ADC

Wang Hao, Zhong Lungui, Xie Wenming, Zheng Shaofeng

(College of Information Science and Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: An energy-efficient charge-average capacitor switching scheme was proposed for successive approximation register analog-to-digital converters (SAR ADCs). The charge-average technique ensures constant common-mode voltage V_{CM} , which is $V_{REF}/2$. Thus, only two reference voltages, V_{REF} and ground, are utilized, avoiding extra circuit for generating references. Besides, to add one more bit precision and to keep common-mode voltage constant, a dummy capacitor is realized by C-2C structure instead of unit capacitor C. As a result, the proposed switching technique can save energy by 66.65% and reduce capacitor area by 49.41%, respectively, compared to the monotonic switching scheme. Behavioural simulation results indicate that the proposed switching scheme is effective.

Keywords: high energy-efficiency; charge-average; switching scheme; successive approximation register analog-to-digital converters (SAR ADC)

近几年, SAR ADC 因其极低的功耗而广泛应用于无线传感网络和生物医学器件中。SAR ADC 主要包括 3 个部分: 数模转换器 (digital-to-analog converter, DAC)、比较器和 SAR 控制逻辑。SAR 控制逻辑受益于先进的工艺和较低的电源电压, 功耗比较低; 动态比较器只在再生状态消耗能量。因此, DAC 在 SAR ADC 功耗中起支配作

用。人们陆续提出一些 DAC 低功耗开关方法^[1-5]。和传统结构 SAR ADC 开关方法相比, 单调结构开关方法^[1]、三电平结构开关方法^[2]、电荷均值开关方法^[3]、Rahimi & Yavari 开关方法^[4]和 Kim 开关方法^[5]开关能量分别减少 81.2%, 96.89%, 74.76%, 93.7% 和 91.02%。但是这 5 种开关方法均存在一些缺陷。其中, 三电平结构开

收稿日期: 2017-03-30

基金项目: 福建工程学院科研启动基金 (GY-Z160057, GY-Z11002); 福建省教育厅资助项目 (JAT160314, JA06031)

通讯作者: 王浩 (1987-), 男, 山东滕州人, 讲师, 博士, 研究方向: 模拟及混合信号集成电路设计。

关方法^[2]和 Rahimi & Yavari 开关方法^[4]功耗较低,但是需要额外的基准产生电路,消耗的总能量会增加。单调结构开关方法^[1]、电荷均值开关方法^[3]和 Kim 开关方法^[5]只需要两个参考电平,但是功耗偏高。在结合电荷均值开关方法和 C-2C 结构电容的基础上,提出一种高效率的电荷均值开关方法。

1 高效率电荷均值开关方法

高效率电荷均值开关方法 3 位结构如图 1 所示。很明显,参考电容 C 被 C-2C 结构电容取代,这会增加 1 位精度。首先,采用上极板采样而不是下极板采样,并且对应电容的下极板连接到一起。然后,打开采样开关。通过比较,在没有消耗开关能量的情况下,获得了最高有效位(most sig-

nificant bit, MSB),因为电容连接状态没有发生改变。如果 MSB = “1”, V_{DACP} 端的 MSB 电容,也就是最大电容切换到地,它所对应的 V_{DACN} 端的 MSB 电容切换到 V_{REF} ,其他电容连接状态不变。如果 MSB = “0”,情况相反。通过再一次比较,得到了次高有效位 2nd-MSB。上述位产生过程一直重复直到获得次低有效位 2nd-LSB。与此同时,C-2C 结构电容中的一个电容 C 和前面的切换类似。通过最后一次比较,获得了最低有效位(least significant bit, LSB)。

输出电压共模电平以及波形的逐次逼近过程如图 2 所示。由图 2 可以看到,DAC 输出共模电压 V_{CM} 始终保持不变,因为较小的电压增加部分和较大电压增加部分数量相等。恒定的共模电压可以降低对比较器输入失调电压的要求。

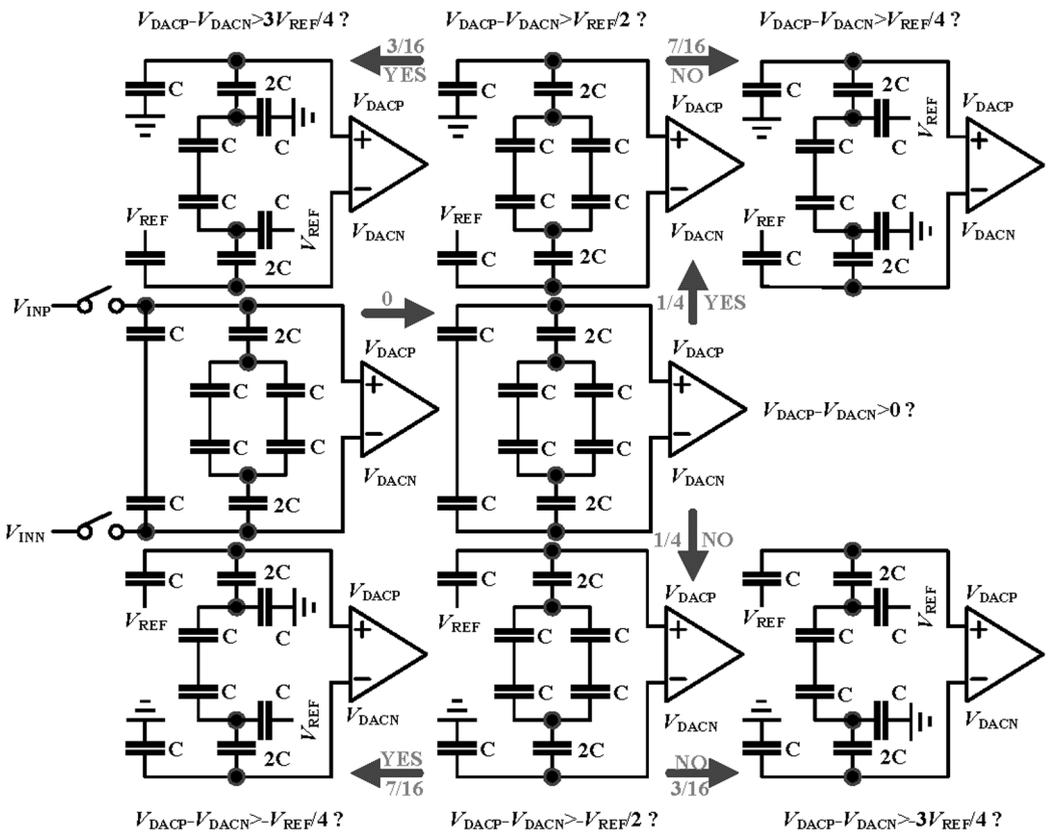


图 1 提出的 3 位开关方法

Fig.1 The proposed 3-bit switching scheme for SAR ADC

2 DAC 输出精度

踢回噪声是值得重视的一个问题,因为它会

导致 DAC 输出瞬间上升或下降。结果,其共模电压 V_{CM} 也会随之上升或下降。下面用数学分析来阐述 V_{CM} 变化对 DAC 输出精度的影响。如果

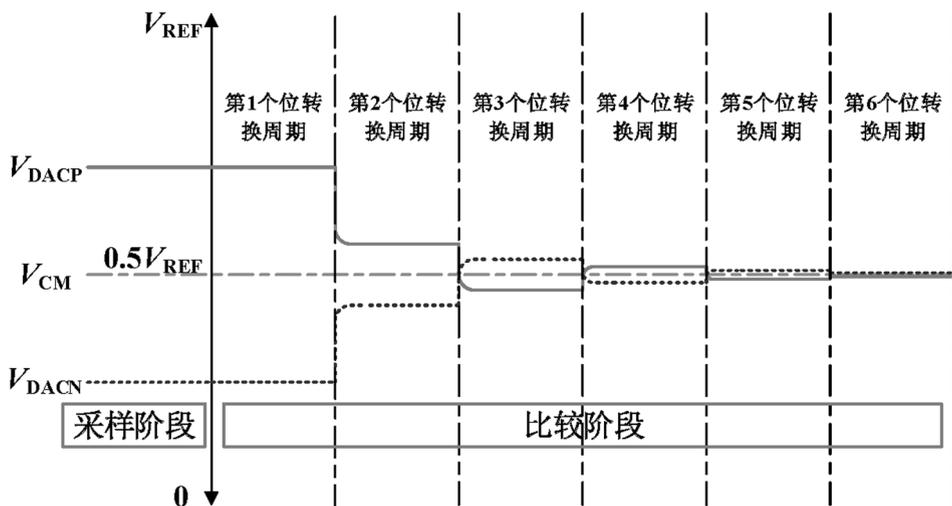


图2 提出的开关方法的逐次逼近波形

Fig.2 Successive approximation waveform of the proposed switching scheme

V_{DACP} 和 V_{DACN} 有同样的变化量 ΔV , 其共模电压为 $V_{CM} \pm \Delta V$ 。假设第 i 位为“1”, 则在第 $(i+1)$ 位转换过程中,

$$V_{DACP}(i+1) = [V_{DACP}(i) \pm \Delta V] - 2^{-i}(V_{CM} \pm \Delta V) \quad (1)$$

$$V_{DACN}(i+1) = [V_{DACN}(i) \pm \Delta V] + 2^{-i}[V_{REF} - (V_{CM} \pm \Delta V)] \quad (2)$$

根据(1)和(2), 可以得到 DAC 输出电压

$$V_{DAC}(i+1) = V_{DACP}(i+1) - V_{DACN}(i+1) = V_{DAC}(i) - 2^{(-i)}V_{REF} \quad (3)$$

很明显, 踢回噪声引起 V_{CM} 变化并不会影响 DAC 输出精度, 因为它采用了差分结构。

3 开关能耗分析

下面对提出的开关方法的 10 位 SAR ADC 进行行为建模。表 1 对开关能量和单位电容 C 的数量进行比较。所提出的开关方法只消耗 $85.21 CV_{REF}^2$ 开关能量, 比传统开关方法减少了 93.75%。这比 Rahimi & Yavari 开关方法^[4] 有竞争力。电荷均值开关方法^[3] 和 Kim 开关方法^[5] 分别消耗 $344.1 CV_{REF}^2$ 和 $122.4 CV_{REF}^2$, 两者都没有所提出的开关方法有优势。由于采用了 C-2C 结构电容, 所提出的开关方法需要的 C 的数量比传统开关方法减少了 74.71%。总之, 这一开关方法在两参考电压中能效最高、面积最小。

表 1 不同开关方法性能比较

Tab.1 Comparison among different switching schemes

开关方法	平均开关能量/ CV_{REF}^2	节约能量/%	C 数量/个	节约电容量/%
单调结构 ^[1]	255.5	参考	1 024	参考
电荷均值结构 ^[3]	344.1	-34.68	1 024	0
Kim ^[5]	122.4	52.09	1 024	0
提出的结构	64.0	74.95	518	49.41

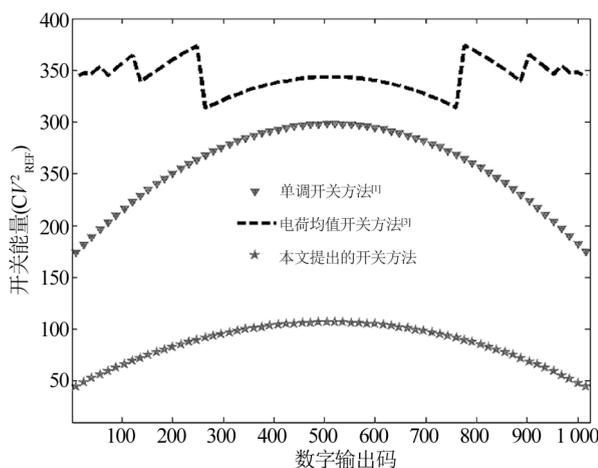


图3 不同结构开关方法消耗开关能量

Fig.3 Switching energy consumed by different schemes

图 3 为其开关能量和其他开关方法随数字输出码的变化情况。假设每一个数字输出码等概率出现, 对于 N 位 SAR ADC 来讲, 所提出的开关方

法消耗的平均开关能量为

$$E_{\text{avg}} = \left[\sum_{i=1}^{N-2} (1 - 2^{-i}) 2^{N-3-i} + \left(\frac{3}{8} - \frac{1}{2^{N+1}} \right) \right] CV_{\text{REF}}^2 \quad (N \geq 3) \quad (4)$$

4 线性分析

C-2C 结构电容中衰减电容 2C 的上极板寄生效应可以忽略,因为它只会导致增益误差而不会影响线性性能。假设 2C 下极板寄生电容为 C-2C 结构电容(2C+C+C)的 5%,并且单位电容服

从高斯分布,标准差为 1%。为了分析所提出的高效开关方法的线性,进行了 1 000 次蒙特卡洛仿真,其积分非线性(integral-nonlinearity, INL)和差分非线性(differential-nonlinearity, DNL)标准差如图 4 所示。

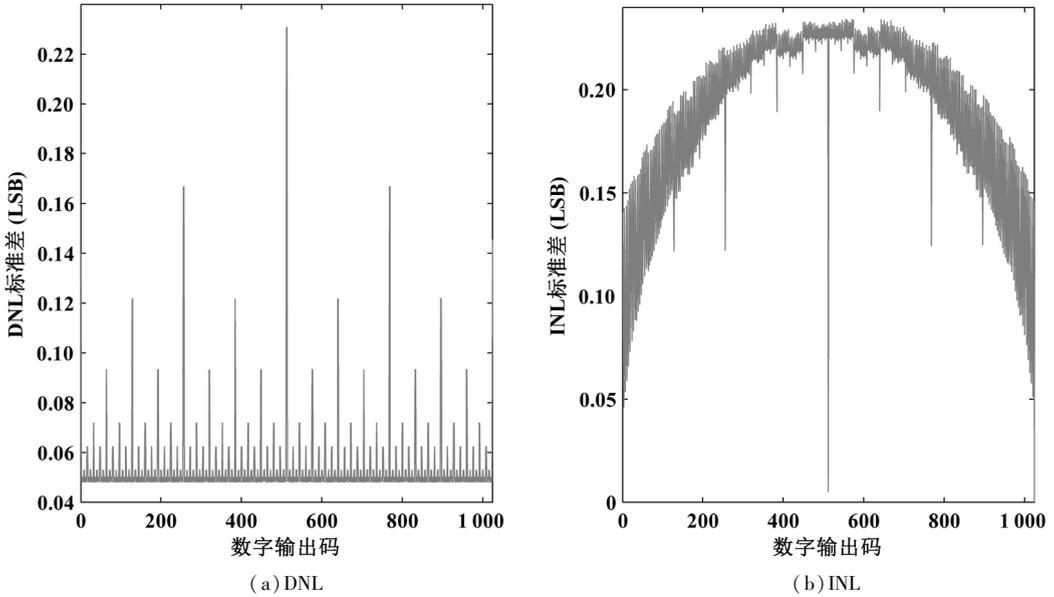


图 4 DNL 和 INL 标准差随数字输出码变化情况

Fig.4 The standard deviation of DNL and INL vs digital output (code)

5 结论

提出一种应用于 SAR ADC 高效电荷均值开关方法。该方法结合了电荷均值开关方法和

C-2C 结构电容。与传统开关方法相比,其开关功耗和电容面积分别减少了 93.75% 和 74.41%,并且输出电压共模电平恒定,适用于低功耗 SAR ADC 应用。

参考文献:

- [1] Liu C C, Chang S J, Huang G Y, et al. A 10-bit 50-MS/s SAR ADC with a monotonic capacitor switching procedure[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2010, 45(4): 731-740.
- [2] Yuan C, Lam Y. Low-energy and area-efficient tri-level switching scheme for SAR ADC[J]. Electronics Letters, 2012, 48(9): 482-483.
- [3] Liou C Y, Hsieh C C. A 2.4-to-5.2 fJ/conversion-step 10b 0.5-to-4MS/s SAR ADC with charge-average switching DAC in 90nm CMOS[C]//IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC). San Francisco, CA, USA. Feb 17-21, 2013. Washington: IEEE, 2013.
- [4] Rahimi E, Yavari M. Energy-efficient high-accuracy switching method for SAR ADCs[J]. Electronics Letters, 2014, 50(7): 499-501.
- [5] Kim J E, Cho S J, Kim Y S, et al. Energy-efficient charge-average switching DAC with floating capacitors for SAR ADC [J]. Electronics Letters, 2014, 50(16): 1131-1132.