

引用格式:陈铖颖,王悦,高代法,等.面向陀螺仪应用的两步逼近电容-电压转换电路[J].微电子学与计算机,2021,38(9):99-104. [CHEN C Y, WANG Y, GAO D F, et al. A two-step approximation capacitance-voltage circuit design for gyroscope application[J]. Microelectronics & Computer, 2021, 38(9): 99-104.]

面向陀螺仪应用的两步逼近电容-电压转换电路

陈铖颖,王悦,高代法,尹家宇,王晓荃
(厦门理工学院 光电与通信工程学院,福建 厦门 361024)

摘 要:设计了一款面向 MEMS 陀螺仪检测应用的两级电容-电压转换电路.电路采用输入共模反馈技术,降低了寄生电容和增益电容引起的输入共模电压漂移;同时结合相关双采样、补偿电容与保持电容技术,实现了两步逼近的电压输出,降低了增益误差,提高了输出信号频率和精度.电路采用 SMIC 0.18 μm 1P6M 工艺进行实现.后仿真结果表明:电源电压 3.3 V,在 500 kHz 采样时钟频率下,最大处理信号频率 20 kHz,电容-电压灵敏度为 12.4 mV/fF;在 100 Hz 带宽内输出信号动态范围为 62.3 dB,平均功耗 3.85 mW.

关键词:陀螺仪;电容-电压转换;输入共模反馈;两步逼近

中图分类号: TN492

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2021)09-0099-06

A two-step approximation capacitance-voltage circuit design for gyroscope application

CHEN Chengying, WANG Yue, GAO Daifa, YING Jiayu, WANG Xiaoquan

(School of Opto-electronic and Communication Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China)

Abstract: For Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) gyroscope detection application, a two-stage capacitance-voltage (CV) circuit is presented. The input common-mode feedback technology is used to reduce the input common-mode voltage drift caused by parasitic and gain capacitors. Meanwhile, combined with correlated double sampling, compensation and holding capacitor technology, the two-step approximation voltage output is realized, which decrease the gain error, improves the frequency and accuracy of output signal. The circuit is fabricated by SMIC 0.18 μm 1P6M CMOS process. The post-simulation results show that in 3.3 V supply voltage, with 500 kHz clock frequency, the maximum signal frequency is 20 kHz, the C-V sensitivity is 12.4 mV/fF. Within 100 Hz bandwidth the dynamic range (DR) is 62.3 dB, and average power consumption is 3.85 mW.

Key words: gyroscope; capacitance-voltage; input common-mode feedback; two-step approximation

1 引言

引近年来,随着微机械系统(MEMS)的快速发展,电容型 MEMS 陀螺仪因其低功耗、低温漂、高精度以及与 CMOS 工艺兼容等优势,在卫星、车载、深海等惯性导航系统中得到了广泛应用.电容型

MEMS 陀螺仪作为一个传感换能单元,将角速度转换为差分电容变量.为了进行后续数据处理,需要在处理器和 MEMS 陀螺仪之间加入模拟前端电路(主要包括电容-电压转换电路、Sigma delta 模数转换器两部分)^[1-4],将电容物理量转换为数字量.而作为模拟前端电路第一级的电容-电压转换电路,其噪声

收稿日期:2020-12-14;修回日期:2021-01-22

基金项目:国家自然科学基金项目(61704143);福建省自然科学基金面上项目(2018J01566);厦门市青年创新基金项目(3502Z20206074)

底板、动态范围、线性度、建立时间等参数更是系统成败的关键. 传统的电容-电压转换电路通常采用两相时钟控制的相关双采样电路, 来抑制低频噪声和输入失调电压^[5-6]. 但全差分运放输入端非零虚地点以及差分共模电压失配产生的“1/A 误差”, 仍极大的降低了该类型电路输出信号精度^[7-8]. 针对以上问题, 本文采用输入共模电压反馈以及两步逼近结合的设计原理, 设计了一款两级结构的电容-电压转换电路. 该电路在第一级中加入输入电容补偿阵列, 以匹配陀螺仪与模拟前端电路键合过程中产生的寄生电容. 差分输入端通过引入输入共模反馈电路, 降低寄生电容、增益电容失配造成的电压误差, 稳定输入共模电压. 同时也有效抑制了共模电压漂移引起的

热噪声. 同时, 采用补偿电容与保持电容结合的两步逼近电路策略, 避免输出电压在两相时钟中的归零状态, 实现了高速、高精度的信号输出. 最后, 在两级电路中都采用了电容可调阵列, 以实现宽电容变化范围的增益可调.

2 电容-电压转换电路

本文设计的电容-电压转换(CV)电路如图 1 所示, 主要包括两级电容-电压转换电路, 两相非交叠时钟产生电路(载波时钟电路、内部时钟电路)、三个带隙基准源、低压差线性稳压器(LDO)、两个缓冲器以及 8 分频电路.

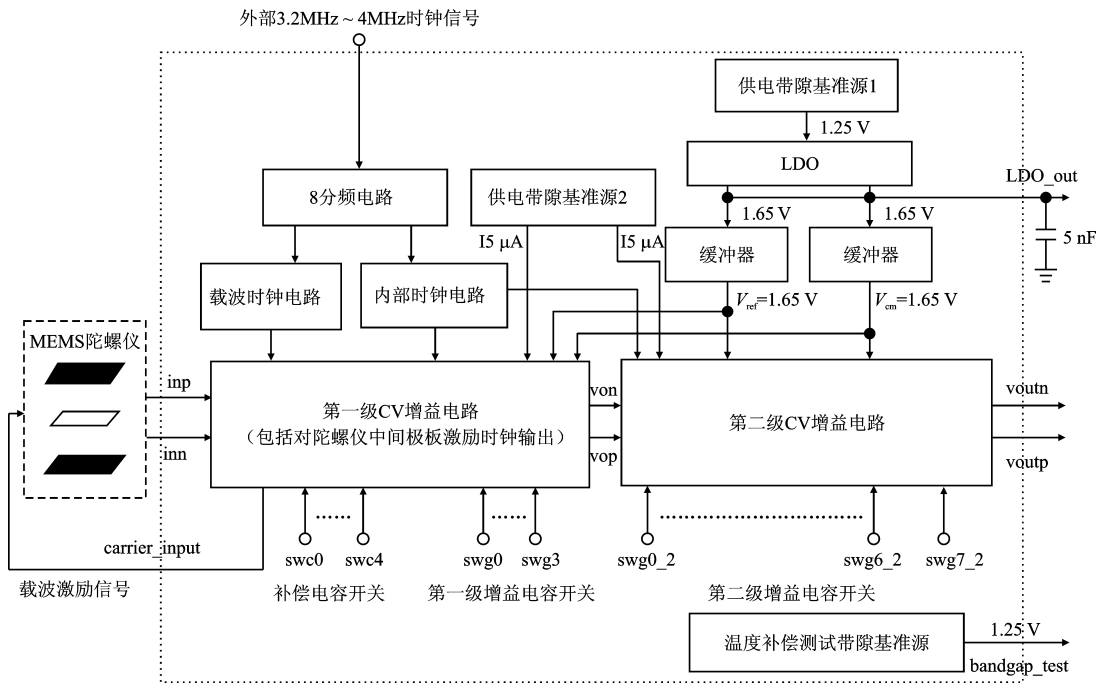


图 1 电容-电压转换电路框图

电容-电压转换电路后级需要连接 Sigma delta 模数转换器进行数字量化. 由于模数转换器的时钟频率在 3.2~4 MHz 之间, 且陀螺仪信号最高频率为 20 kHz, 过高的调制载波时钟频率会极大增加电路功耗, 因此通过 8 分频电路将模数转换器时钟降低为 400~500 kHz, 对陀螺仪输出的 20 kHz 信号进行调制. 为了避免输出至片外的载波激励信号与片内电容-电压转换电路的串扰, 本文采用两个独立的时钟电路分别产生片外和片内的两相时钟信号. 第一级和第二级电容-电压转换电路都采用两步逼近的积分器结构进行实现, 且分别设置了 4 bit (swg0-swg3) 和 8 bit (swg0_2-swg7_2) 的增益电容

阵列, 以满足不同陀螺仪电容值的检测要求. 其中第一级电路电容-电压转换电路还包括一个 5 bit 的补偿电容阵列 (swc0-swc4), 对陀螺仪以及键合产生的寄生电容实现步长 300 fF, 总补偿电容 9.6 pF 的匹配, 降低对共模电压漂移的影响. 供电带隙基准源 1 为 LDO 提供 1.25 V 参考电压, 并由 LDO 输出两路 1.65 V 基准电压, 经过缓冲器后形成电容-电压转换电路的参考电压 V_{ref} 和共模电压 V_{cm} . 其中 LDO 的主极点位于输出极, 在片外加入一个 5 nF 电容稳定其频率特性. 供电带隙基准源 2 输出两路 5 μ A 电流对 CV 电路进行偏置. 温度补偿测试带隙基准源输出一路 1.25 V 电压至片外, 作为系统测试

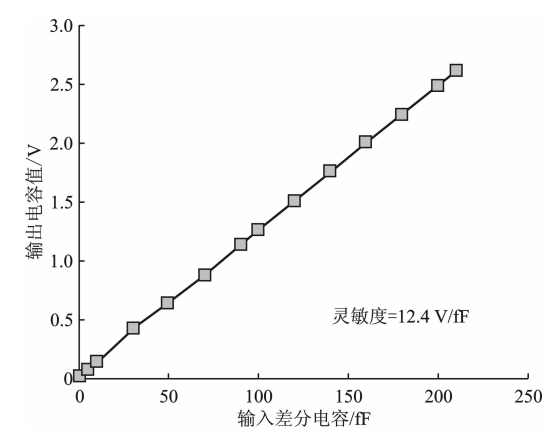


图 8 输出差分电压与输入电容灵敏度曲线

9 所示,当电源电压为 3.3 V,差分电容变化频率为 20 kHz,采样信号为 500 kHz 时,在所需测量的 100 Hz 有用信号带宽内,输出动态范围约为 62.3 dB. 同时进行功耗仿真,功耗为 3.85 mW. 整体电路性能指标比较如表 1 所示. 本文电路在相近工艺和电源电压环境下,具有较大的信号带宽,且获得了较优的动态范围和较低的功耗结果.

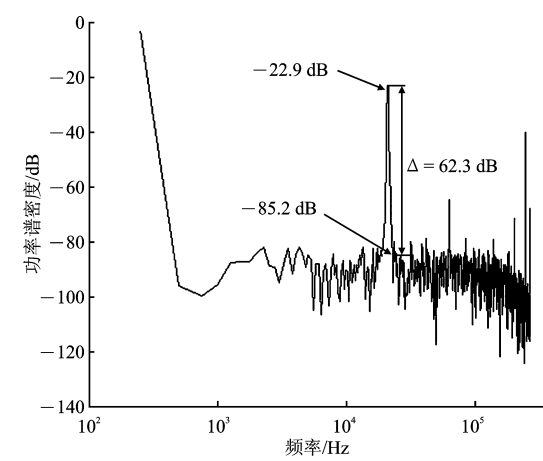


图 9 输出信号频谱图

表 1 电容-电压转换电路性能参数比较

参考文献	工艺 /nm	电源电压 /V	信号带宽 /kHz	动态范围 /dB	功耗 /mW
文献[3]	CMOS 180 nm	1.8	5	55.8	9
文献[5]	CMOS 350 nm	1.5	>0.2	—	3.5
文献[9]	CMOS 350 nm	1.5	20	>60	2.7
文献[10]	CMOS 350 nm	5	2.75	>100	—
本文	CMOS 180 nm	3.3	20	62.3	3.85

5 结束语

本文针对 MEMS 陀螺仪检测应用,在 SMIC 0.18 μm 1p6m 工艺上设计了一款两步逼近的电容-电压转换电路.电路采用补偿电容阵列、增益电容阵列的方式分别匹配寄生电容和后级模数转换器输入摆幅的要求.在两级电容-电压转换电路中利用补偿电容和保持电容,实现了两步逼近的输出信号建立,提高了输出信号的建立速度和精度.在第一级电路中还引入输入共模反馈电路,抑制输入共模电压漂移的影响.后仿真结果显示,当电源电压为 3.3 V 时,电容-电压转换电路最大处理信号频率为 20 kHz,电容-电压转换灵敏度为 12.4 mV/fF.在所需的 100 Hz 信号带宽内,动态范围达到 62.3 dB,有效精度约为 10.05 bit,功耗 3.85 mW,可满足中高精度 MEMS 陀螺仪的检测需求.

参考文献:

[1] AMINI S, JOHNS D A. A flexible charge-balanced ratiometric open-loop readout system for capacitive inertial sensors[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2015, 62(4): 317-321. DOI: 10.1109/TCSII.2014.2387551.

[2] LAN J C, HSUEH Y H, HUNG C. Integrated chip of capacitive three-axis accelerometer and sensing circuit[J]. Electronics Letters, 2015, 51(20): 1576-1578. DOI: 10.1049/el.2015.0591.

[3] LIAO Y T, HUANG S C, CHENG F Y, et al. A fully-integrated wireless bondwire accelerometer with closed-loop readout architecture[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2015, 62(10): 2445-2453. DOI: 10.1109/TCSI.2015.2471595.

[4] WANG Y M, CHAN P K, LI H K, et al. A low-power highly sensitive capacitive accelerometer IC using auto-zero time-multiplexed differential technique [J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(11): 6179-6190. DOI: 10.1109/JSEN.2015.2448600.

[5] ZHAO Y, ZHAO J, WANG X, et al. A Sub- μg bias-instability MEMS oscillating accelerometer with an ultra-low-noise read-out circuit in CMOS [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2015, 50(9): 2113-2126. DOI: 10.1109/JSSC.2015.2431076.

[6] WANG X, ZHAO J, ZHAO Y, et al. A 0.4 μg bias instability and 1.2 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ noise floor MEMS silicon oscillating accelerometer with CMOS readout circuit

- [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2017, 52(2): 472-482. DOI: 10.1109/JSSC.2016.2609385.
- [7] ZHONG L J, LAI X Q, XU D L, et al. Oversampling successive approximation technique for MEMS differential capacitive sensor[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2018, 53(8): 2240-2251. DOI: 10.1109/JSSC.2018.2827922.
- [8] ZHONG L J, LAI X Q, SONG H J, et al. Differential capacitive readout circuit using oversampling successive approximation technique[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2018, 65(12): 4072-4085. DOI: 10.1109/TCSI.2018.2849992.
- [9] 吴其松, 杨海钢, 张翀, 等. 一种适用于 MEMS 陀螺仪的高性能电容读出电路[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(4): 937-943. DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.2010.04.036.
- WU Q S, YANG H G, ZHANG C, et al. High-performance capacitive readout circuit for MEMS gyroscope[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(4): 937-943. DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.2010.04.036.
- [10] ZHAO J, WANG X, ZHAO Y, et al. A 0.23- μg bias instability and 1- $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ acceleration noise density silicon oscillating accelerometer with embedded frequency-to-digital converter in PLL[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2017, 52(4): 1053-1065. DOI: 10.1109/JSSC.2016.2645613.

作者简介:

陈铖颖 男, (1982-), 博士, 副教授. 研究方向为混合信号集成电路设计. E-mail: chenchenying363@163.com.

王悦 女, (1997-), 硕士研究生. 研究方向为混合信号集成电路设计.

高代法 男, (1994-), 硕士研究生. 研究方向为混合信号集成电路设计.

尹家宇 男, (1997-), 硕士研究生. 研究方向为混合信号集成电路设计.

王晓荃 男, (1997-), 硕士研究生. 研究方向为混合信号集成电路设计.