

非均匀性校正的长波光导探测器读出电路设计

钟燕平^{1,2}, 袁红辉¹, 鞠国豪¹

- (1. 中国科学院上海技术物理研究所 红外成像材料与器件重点实验室, 上海 200083;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 在航天遥感领域, 波长在 10 μm 以上的长波探测器仍以 HgCdTe 光导型探测器为主, 在红外探测成像方面发挥着重要作用。非均匀性是目前长波光导探测器突出的问题之一, 设计了一种数模混合的非均匀性校正的长波光导探测器读出电路。该电路不仅可以有效地解决线列长波光导探测器电阻非均匀性问题, 还可以增大 ROIC 输出信号的动态范围, 几乎不增加读出电路功耗。经过仿真测试表明: 非均匀性问题有了明显的改善, 能够使其非均匀性降为 0.5% 以内, 在常温和低温下都能正常工作。该校正电路不仅能解决当前工程中的关键问题, 还对今后高性能大面阵长波光导探测器读出电路的设计具有重要的指导意义。

关键词: 非均匀性校正; 长波光导; 红外探测器; 读出电路

中图分类号: TN722 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0104001

Design of ROIC for long wave photoconductive detector with nonuniformity correction

Zhong Yanping^{1,2}, Yuan Honghui¹, Ju Guohao¹

- (1. Key Laboratory of Infrared Imaging Materials and Detectors, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In the field of space remote sensing, the long wave detector with wavelength of 10 μm or more is mainly based on HgCdTe photoconductive (PC) detector, which plays an important role in IR imaging. Nonuniformity is one of the outstanding problems in the long wave PC detector. A new type of long wave PC detector read-out integrated circuit (ROIC) in digital-analog mixed mode with nonuniformity correction was designed. The circuit could not only effectively solve nonuniformity of the linear long wave PC detector in resistance, but also increase the dynamic range of the output signal of the ROIC with almost no increase in power consumption. Simulation results show that the nonuniformity is greatly improved through the correction ROIC, which makes the nonuniformity reduce to less than 0.5%, and it can work at room temperature and low temperature. The correction circuit could not only solve the key problems in current project, but also have guiding significance for circuit future design of high performance large array IR detector.

Key words: nonuniformity correction; long wave photoconductive; IR detector; ROIC

收稿日期: 2017-06-01; 修订日期: 2017-08-15

基金项目: 中国科学院微小卫星重点实验室开放课题基金(KTKT16-03)

作者简介: 钟燕平(1993-), 男, 硕士生, 主要从事 CMOS 集成电路的设计方面的研究。Email: ypzhang@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 袁红辉(1972-), 男, 研究员, 博士, 主要从事模拟 CMOS 集成电路的设计与测试方面的研究。Email: yuanhonghui@163.com

0 引言

红外探测器在航天探测方面起着不可替代的作用,长波红外探测器(波长在 $10\ \mu\text{m}$ 以上)在低温目标探测、超视距探测和抗干扰目标识别等领域具有极其重要的用途,因此一直是红外探测器技术发展的一个重要方向^[1-2]。对于 HgCdTe 长波红外光导型探测器,怎么解决不同探测元之间的读出信号非均匀性是电路设计的关键难题和研究重点。

在 HgCdTe 长波光导型探测器制作过程中,由于工艺偏差和材料组分的缺陷,光导红外探测器存在一定的非均匀性。这种工艺带来的非均匀性不但严重影响读出电路的动态范围,而且会导致输出表现出非均匀性,尤其是采用列级读出通道的探测器芯片会出现明显的列条纹,这种非均匀性产生的空间噪声通常远远大于时间噪声^[3]。由于光导型红外探测器电阻低且非均匀性大,影响光导探测器非均匀性的自身因素主要有电阻、电阻温度系数、热导、红外吸收率、热容等,其中电阻的非均匀性对输出带来的影响最大^[4]。目前,波长在 $10\ \mu\text{m}$ 以上的红外探测器仍以

HgCdTe 光导型探测器为主,电阻在 $40\ \Omega$ 左右,在目前工艺基础上,其电阻一般存在 $\pm 10\%$ 左右误差。

虽然一般的非均匀性可以由外部电路校正,但是会减小探测器的动态范围,而且针对性不强,效果一般,具有一定的局限性。目前国内外几乎没有针对光导型探测器非均匀性的片上校正电路,因此亟需在片上读出电路中采用相应的技术以解决光导型红外探测器非均匀性问题。

1 电路系统结构设计

文中针对光导探测器电阻的非均匀性设计了一种片上校正读出电路,在探测器读出电路端采用逐次逼近式的匹配电阻结构单元,在信号放大之前达到校正效果。线列的红外探测器一位像元对应的非均匀性校正电路和读出电路结构原理如图 1 所示。该电路包括差分运算放大器(Dif_amp)模块,比较器(Comparator)模块,计数器(Counter)模块,参考电阻结构单元(R_{ref})模块以及时钟(CLK),开关 S 和置零端 R。校正的方法是在信号读取之前先为每一个探测元匹配一个等效电阻作为输入端参考电压的偏置电

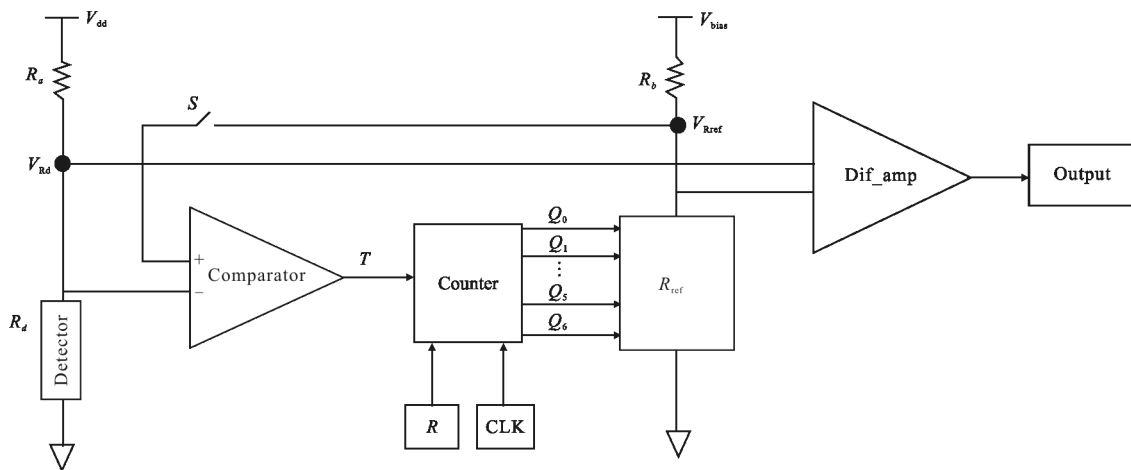


图 1 非均匀性校正读出电路结构图

Fig.1 Structure of ROIC with nonuniformity correction

阻,匹配电阻由数字电路控制的电阻结构单元组成,使未读取信号之前差分放大的两个输入电压几乎相等,从而消除不同探测元电阻不均匀的影响。电路工作的具体过程分为两步,第一步开关 S 闭合,比较器和计数器通电,输入置零信号和时钟信号,比较器比较探测器端和参考电阻电压的大小,若 $V_{R_{\text{ref}}} > V_{R_d}$,则

计数器计数,计数器控制参考电阻大小, R_{ref} 减小,导致 $V_{R_{\text{ref}}}$ 减小,不断循环直至 $V_{R_{\text{ref}}} \leq V_{R_d}$ 时,计数器保持不变,这部分工作在微秒的时间内完成。第二步开关断开,再断开比较器电源和时钟信号,计数器不断电,使参考电阻结构单元阻值保持不变,再经差分放大器串行读出,得到均匀的信号。

电源电压采用 2.5 V 直流电压,如果流过探测器的电流太大,会使探测器发热加剧,太小的电流会使探测器产生的电压信号太小,不利于信号的高性能读出,所以偏置电阻设计 $R_a=R_b=1\text{ k}\Omega$ 。正常情况下, $V_{\text{bias}}=V_{\text{dd}}$, V_{bias} 可根据实际情况进行微调以扩大电路的适用范围。通过实验测得 40 元 HgCdTe 光导型探测器电阻如图 2 所示,去除盲元,电阻 R_d 阻值在 38.3~46.5 Ω 范围内,流过探测器的电流为 2.4 mA 左右,分压在 92~111 mV 范围内, R_d 均值为 41.99 Ω ,非均匀性为 19.5%。

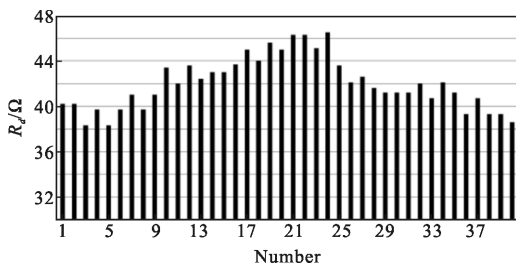


图 2 40 元 HgCdTe 光导型探测器电阻非均匀性

Fig.2 Nonuniformity of 40 HgCdTe PC detectors in resistance

由于电阻结构单元的阻值变化范围应大于 R_d 的范围,并且综合考虑电阻精度的要求,因此设计参考电阻结构单元阻值由七位的二进制计数器控制。考虑到芯片电阻工艺误差,电阻结构单元采用高电阻并联的方式,图 3 给出了参考电阻结构单元图。其由一个初始电阻和 7 条多晶硅电阻经对应的 NMOS 管并联组成, M1~M7 的栅分别对应计数器 Q0~Q6。设计电阻值变化范围在 50~35 Ω ,步长在 0.12 Ω 左右, $V_{R_{\text{ref}}}$ 变化范围 119~86 mV,能够使校正后的电阻差值 $\Delta R=|R_{\text{ref}}-R_d|<0.2\text{ }\Omega$,分压差值 $\Delta V=|V_{R_{\text{ref}}}-V_{R_d}|<0.4\text{ mV}$ 。

图 4 给出了七位同步二进制加法计数器电路结构,计数器由 7 个上升沿 T 触发器、12 个与门和一个与非门组成,采用单向计数的方式,计数信号由比较器输出值 T 控制, T=1 时,计数器在一个脉冲周期内的一个上升沿计一位,相应的电阻结构单元阻值减小一个单元。当 T=0 时,计数器保持不变。为保证计数器不循环,即当计数器 Q0~Q6=1 111 111 时,不

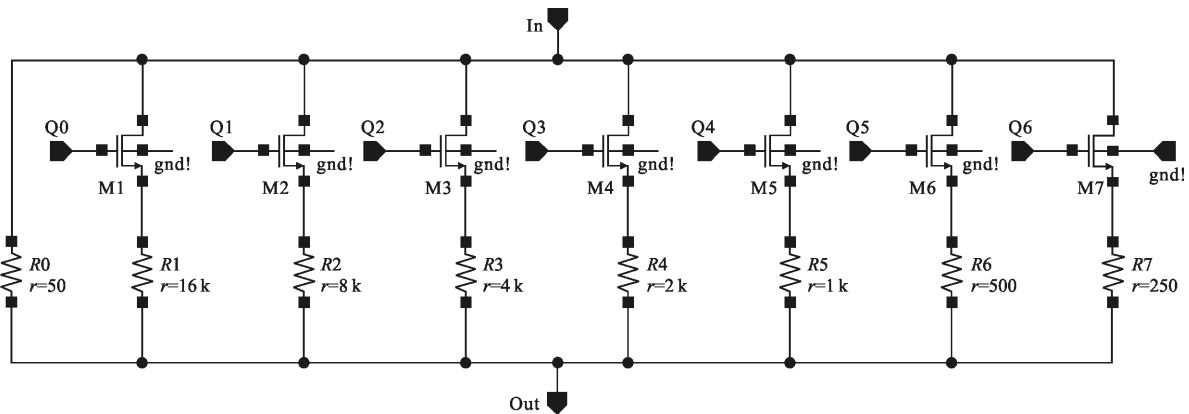


图 3 参考电阻结构单元

Fig.3 Structure unit of reference resistance

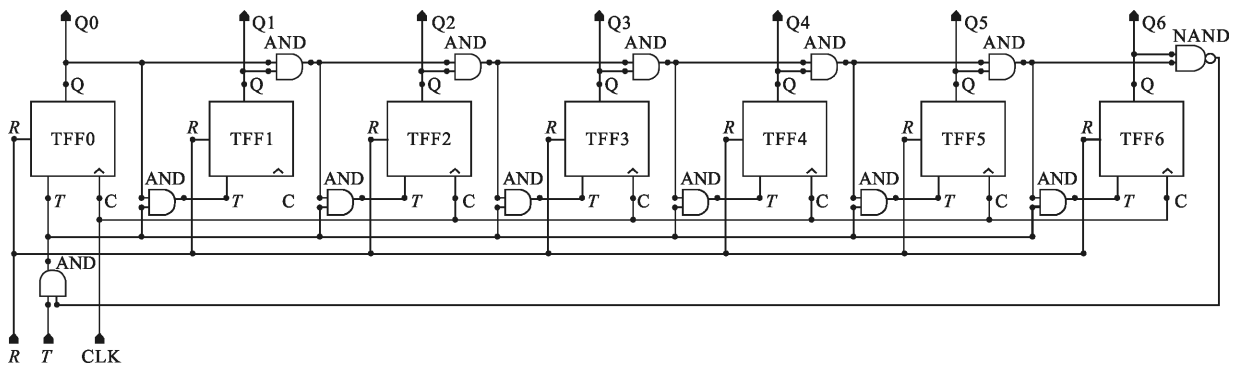


图 4 七位同步二进制加法计数器电路结构

Fig.4 Circuit structure of 7-bit synchronous binary addition counter

再跳为 0 000 000，在第 7 个计数器后通过一个与非门和一个与门反馈到 T 上，使得当探测器电阻小于参考电阻设计的最小值时，参考电阻取最小值。

电压比较器电路采用的是静态两级比较器，输入端采用的是 PMOS 管做差分输入，图 5 为第一级预放大正反馈判决电路。该电路利用 M9 管和 M10 管互联的交叉栅极的正反馈来提高判决电路的增益^[5]。

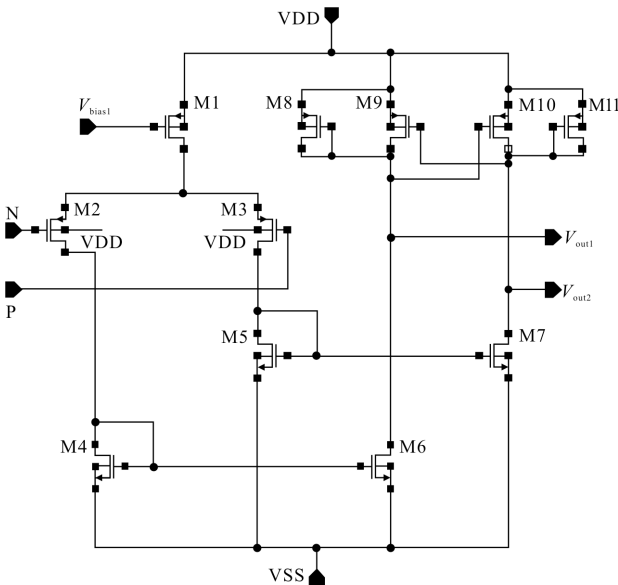


图 5 第一级预放大电路
Fig.5 First pre-amplifier

图 6 为第二级折叠式共源共栅放大电路，是比较器主要的放大部分。折叠式共源共栅具有增益高，速度快等特点^[6]。两级放大的开环直流电压增益

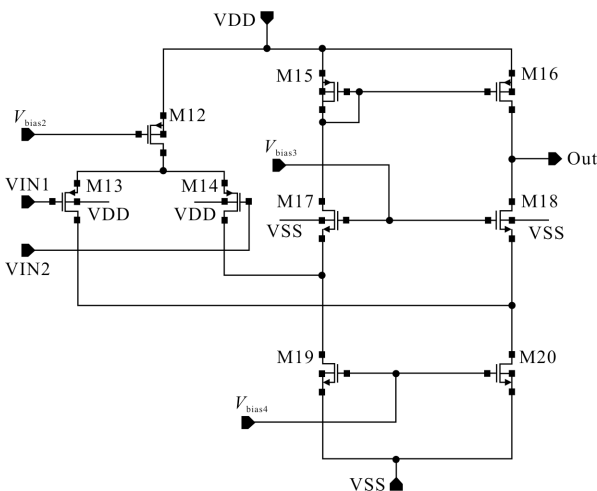


图 6 第二级折叠式共源共栅放大电路
Fig.6 Second folded cascode amplifier

能够达到 80 dB 以上，能使比较器分辨率在 0.2 mV 以下。比较器的输出级采用的是互补输出。由于整个比较器工作在开环状态，所以不需要频率补偿。比较器单独供电，校正完成后比较器和时钟可断电设置保证了校正电路几乎不增加额外功耗和噪声。

2 电路的仿真结果及分析

在探测器偏置电压为 2.5 V，比较器和计数器工作电源电压为 5 V 的条件下，利用上华 CSMC 0.5 μm DPTM mixed signal 工艺模型对非均匀性校正单元电路进行了具体设计并对常温和低温进行了仿真。

2.1 比较器的仿真

图 7 为比较器两级放大器直流扫描仿真结果和图 8 为比较器瞬态响应，N 端参考电压设为 100 mV，常温下，放大器开环增益为 97.84 dB，比较器分辨率大于 0.03 mV，平均传输延迟时间(t_r)约为 500 ns，在分辨 0.1 mV 的电压时， t_r 约为 250 ns (如图 8 所示)。低温 -200 °C 下，开环增益为 95.18 dB，分辨 0.03 mV， $t_r \approx 1.3 \mu s$ ，分辨 0.1 mV， $t_r \approx 400 ns$ ，满足低温工作要求。输入共模范围大于 3.5 V。比较器和差分放大电路的静态功耗均小于 1 mW。

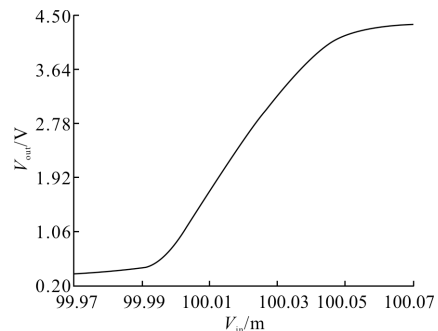


图 7 比较器两级放大扫描仿真结果

Fig.7 Sweep simulation of two-grade amplification of comparator

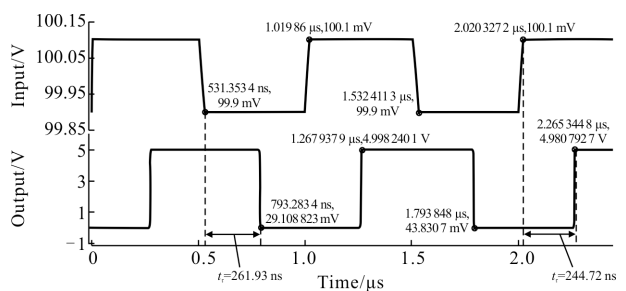


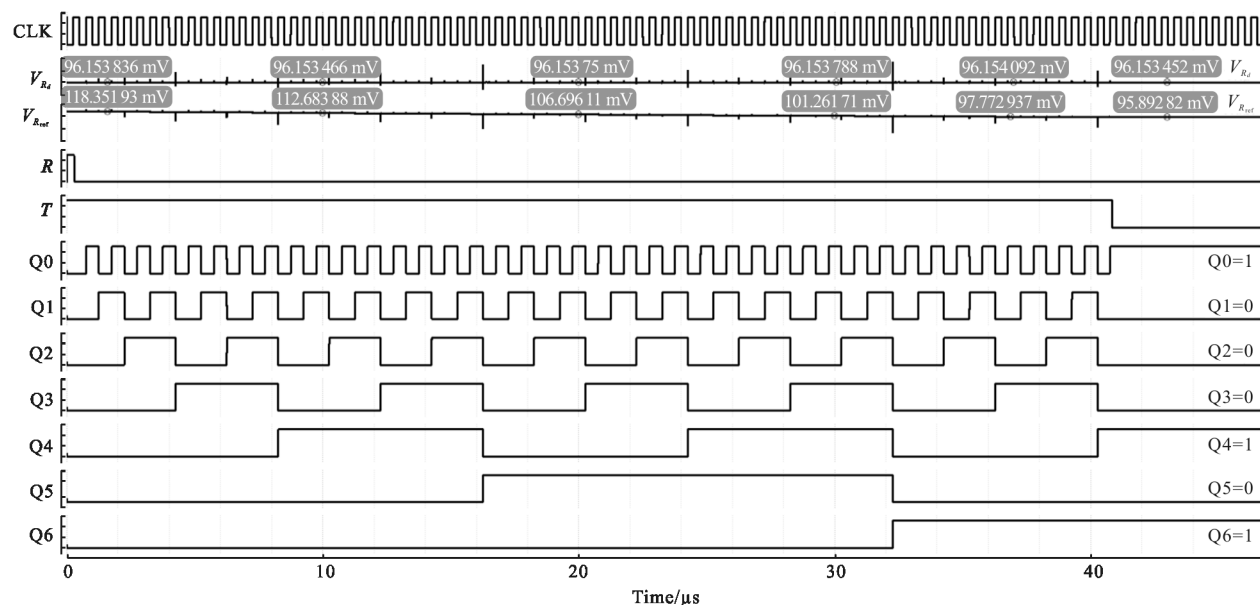
图 8 比较器瞬态响应

Fig.8 Transient response of comparator

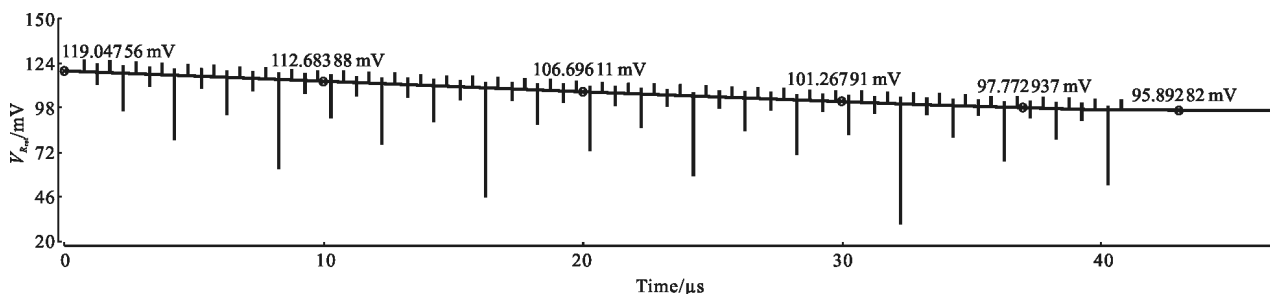
2.2 总电路仿真与分析

时钟脉冲周期应大于比较器的传输延迟时间，周期设为 500 ns，设探测器的一位像元电阻为 $40\ \Omega$

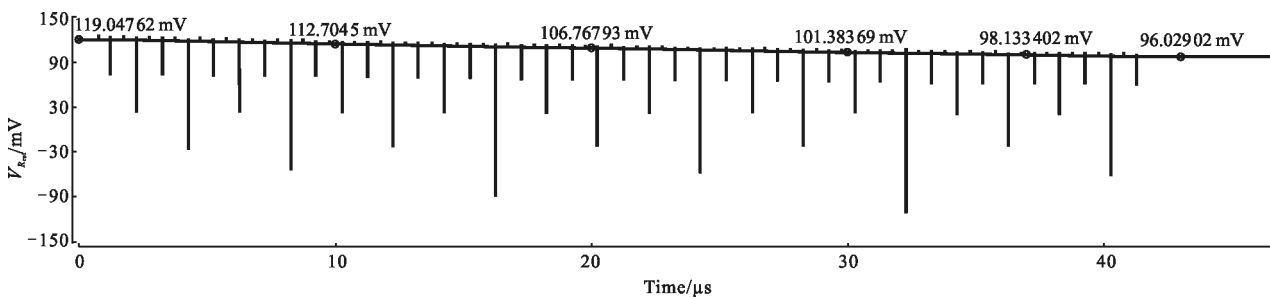
的条件下，常温非均匀性校正电路总仿真校正过程时序图如图 9(a)所示，其中参考电阻结构单元分压 $V_{R_{ref}}$ 变化过程见图 9(b)。低温 $-200\ ^\circ\text{C}$ 下校正结果与常



(a)



(b)



(c)

图 9 非均匀性校正过程

Fig.9 Process of nonuniformity correction

温基本一致,其中 $V_{R_{ref}}$ 变化过程如图 9(c)所示。从图 9(a)中可以看出,计数器和比较器都能正常工作。图 9(b)和(c)中 $V_{R_{ref}}$ 变化时有明显的毛刺,是因为 MOS 开关栅电容导致, MOS 开关的打开和关断对应不同的权电阻,因此在开关的瞬间(10 ns 以下)会造成电压的不稳定,这个时间小于比较器的传输延迟时间(大于 100 ns),同时远小于时钟脉冲周期(大于 500 ns),所以对校正结果并无影响。

常温校正后的计数器最终值为 1 010 001,参考电阻理论值应为 40 Ω ,仿真实际值为 39.89 Ω ,其分压 $V_{R_{ref}}$ 为 95.89 mV,与探测器像元分压 96.15 mV 相差 0.26 mV, -200 $^{\circ}\text{C}$ 时, $V_{R_{ref}}$ 为 96.03 mV,与 V_{R_d} 差值 0.12 mV,在设计误差范围内。在常温 and 低温 -200 $^{\circ}\text{C}$ 下, 35~50 Ω 范围内,经过多次改变探测器阻值,仿真的校正结果 $V_{R_{ref}}$ 与 V_{R_d} 差值 ΔV 都小于 0.4 mV, R_{ref} 与 R_d 电阻差值 ΔR 都小于 0.2 Ω ,均符合预期要求,理论上校正后非均匀性可以降为 0.5%以下。校正后的读出电路动态范围可以达到 70 dB 以上。

3 结 论

设计了一种自动匹配的数模混合的非均匀性校正的红外探测器读出电路,该电路适合电阻较低的光导红外探测器的非均匀性校正。在常温 and 低温下对电路进行了仿真,结果表明该电路能够很好的校

正电阻的非均匀性,能够使探测器在接受红外辐射之前,像元分压和参考电阻分压差值保持在 0.4 mV 内,能使其电阻非均匀性降为 0.5%以下。该校正电路的主要优点有:精度高,校正效果明显,校正时间短,可断电设置使校正电路几乎不增加额外功耗和读出电路噪声,全自动匹配,步骤简单和适用范围广,能在常温 and 低温下工作。该校正电路不仅能解决当前工程中的关键问题,还对今后高性能大面阵长波光导红外探测器读出电路的设计具有重要的指导意义。

参考文献:

- [1] Gong Haimei, Shao Xiumei, Li Xiangyang, et al. Advanced technology and application of spaceborne infrared detectors [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(12): 3129-3140. (in Chinese)
- [2] Rogalski A. History of infrared detectors[J]. *Opto-Electronics Review*, 2012, 20(3): 279-308.
- [3] Shi Haoran, Li Zhaolong, Shen Tongsheng. Research on nonuniformity correction of infrared focal plane array [J]. *Laser and Infrared*, 2016, 46(2): 204-208. (in Chinese)
- [4] Meng Liya. Study on nonuniformity of microbolometer and new NUC readout circuit[D]. Chongqing: Chongqing University, 2005. (in Chinese)
- [5] Jacob B R. CMOS circuit design, layout, and simulation [J]. *IEEE Series on Microelectronic Systems*, 2014: 307-312.
- [6] Behzad Razavi. Design of Analog CMOS Integrated Circuits [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2003: 243-257.