

## 红外焦平面列级 ADC 数字读出电路测试技术研究

岑懿群<sup>1,2</sup>, 张君玲<sup>1</sup>, 陈洪雷<sup>1</sup>, 丁瑞军<sup>1</sup>

- (1. 中国科学院上海技术物理研究所 中国科学院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:** 数字化红外焦平面器件是焦平面发展的重要方向,其核心是读出电路集成高性能模数转换器(ADC)。分析了读出电路数字化输出后焦平面性能参数的评价方法,阐述了红外焦平面列级 ADC 的静态测试和动态测试方法,提出了基于斜坡电压输入的过采样原理测试 ADC 静态性能,提升无码分辨率测试正确性。针对 ADC 静态测试和动态测试要求,结合 Labview 软件和数字采集卡搭建了软硬件测试平台,并通过一款数字焦平面芯片的测试,验证了测试方法和平台适用于行列级 ADC 数字化读出电路的测试评价。

**关键词:** 红外焦平面; 高性能 ADC; 静态参数; 动态参数; 测试平台

**中图分类号:** TN215      **文献标志码:** A      **DOI:** 10.3788/IRLA202049.0404004

## Research on testing technology of column-level ADC in IRFPA digital readout circuits

Cen Yiqun<sup>1,2</sup>, Zhang Junling<sup>1</sup>, Chen Honglei<sup>1</sup>, Ding Ruijun<sup>1</sup>

- (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:** The digitalization of infrared focal plane arrays (IRFPA) is an important direction for the development of IRFPA, the core of which is the integration of high-performance analog-to-digital converter (ADC) in the readout circuits. In this paper, the digital outputs of readout circuits were discussed to evaluate the performances of IRFPA. Otherwise, the static and dynamic testing methods of column-level ADC in IRFPA were elaborated. Among them, the static performances of ADC were tested based on oversampling principle which improved the testing correctness of the no-missing code resolution. For the ADC static and dynamic testing requirements, combined with Labview software and digital signal acquisition equipments, a testing platform of high-performance ADC was built. Through testing a digital IRFPA, it is verified that the testing method and platform can be used for testing evaluation of column-level ADC in digital readout circuits.

**Key words:** IRFPA; high-performance ADC; static parameters; dynamic parameters; testing platform

收稿日期:2019-12-20; 修订日期:2020-01-13

基金项目:航空科学基金(2018249001)

作者简介:岑懿群(1992-),女,博士生,主要从事红外焦平面数字化读出电路等方面的研究。Email: yiqcen@163.com

导师简介:陈洪雷(1979-),男,研究员,主要从事集成电路设计、红外光电器件分析和评价技术等方面的研究。

Email: chenhl@mail.sitp.ac.cn;

丁瑞军(1964-),男,研究员,主要从事集成电路设计、红外光电器件及物理、分析和评价技术等方面的研究。

Email: dingrj@mail.sitp.ac.cn

## 0 引言

近年来,第三代红外成像探测器正向大规模、多谱段、数字化方向发展,先进红外焦平面逐渐片内集成 ADC 实现高速数字信号输出。国外的数字化红外焦平面技术发展迅速,以色列 SCD 公司、法国 Sofradir 公司都推出了集成 ADC 读出电路的红外探测器组件,美国的 MIT 林肯实验室报道了集成 ADC、盲元剔除、非均匀性校正等多种数字功能的智能化焦平面<sup>[1-3]</sup>。目前,国内的数字化焦平面研究也取得了一定的进展,昆明物理研究所、中电第十一研究所、北京大学等机构均报道了集成 ADC 的数字读出电路,其中,640×512 列级 ADC 数字化红外焦平面探测器性能达到了与国外同类探测器相当的水平<sup>[4-7]</sup>。相较于传统模拟读出电路,数字读出电路解决了模拟信号传输速率较低的问题,能够增强电路抗干扰能力,提高焦平面成像的性能,并且可以减小系统成本、简化电路接口<sup>[8-9]</sup>。红外焦平面数字传输芯片直接输出数字信号,传统模拟输出焦平面的性能评价体系不完全适用于数字焦平面,需重新定义数字化焦平面性能的评价标准。ADC 作为数字读出电路的核心组成部分,其性能指标直接影响了整体电路性能,评价数字焦平面性能首先需要精确测试电路中 ADC 的性能。ADC 的系统架构可以分为芯片级、行列级和像素级,行列级 ADC 是目前在红外焦平面应用最广泛的结构。文中基于行列级 ADC 读出电路的测试评价方法进行研究。

一般,ADC 测试方法参考国内航天工业行业标准 QJ3044-98 以及 QJ2614-94。随着 ADC 分辨率和速度的提升,当 ADC 分辨率达到 10 bit 以上时,传统的测试评价方法已经不适用,应选择适合高速高精度 ADC 的测试方法。针对红外焦平面电路的测试需求,文中研究一种应用于高性能 ADC 的静态参数测试方法,采用过采样原理提高静态测试的准确性,另外,阐述了动态测试方法和参数计算方法。同时,根据参数测试方法搭建了软硬件测试平台,对一款红外焦平面 ADC 电路进行了快速可靠的测试,验证了文中测试方法和测试平台的可行性和实用性。

## 1 数字化焦平面性能

### 1.1 数字焦平面参数分析

传统模拟读出电路探测器电流信号经过输入级积分转换为电压信号,电压信号通过采样保持电路得到采样信号,并经过多路传输电路输出最终模拟信号。传统模拟读出电路性能对模拟输出信号进行测试,主要性能指标有输出摆幅、噪声、噪声等效温差等参数。

列级 ADC 数字读出电路基本框图如图 1,像元内积分采样得到的电压信号通过片上列级 ADC 电路模数转换后输出数字信号。数字读出电路测试对输出的数字信号进行采集并处理。整体焦平面性能通过读出电路的数字信号输出来衡量,包括以下几个方面:

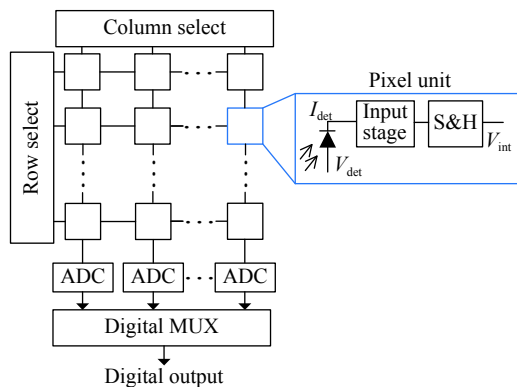


图 1 列级 ADC 数字读出电路架构

Fig.1 Architecture of digital readout circuits with column-level ADC

(1) 读出速率 单位时间内读出的像元个数。模拟读出电路 1 个时钟周期读出 1 个像元的输出信号。数字读出电路一个时钟周期读出 1 bit 数字信号。对于串行输出的数字信号,1 个像元的  $N$  位数字输出需要  $N$  个时钟周期,读出速率为  $1/NT$ 。

(2) 输出摆幅 焦平面最小输出电压到饱和信号输出电压范围。数字电路的输出为 0 到满量程码值  $2^N-1$ , 1 个码值对应 ADC 最小分辨电压  $V_{LSB}$ , 可以得到输出电压范围。

(3) 噪声 焦平面包括光子噪声、探测器噪声和读出电路噪声等,集成 ADC 的读出电路还包括了 ADC 量化噪声。传统焦平面测试平均噪声电压,是焦平面在一定的背景辐照下输出信号电压涨落的均方根值。数字焦平面在一定的背景下,输出为数字码

值, 采样大量输出样本, 码值呈高斯分布, 计算输出码值的均方根值为噪声, 噪声大小直接由 ADC 最低有效位 LSB 衡量, 或根据 1 LSB 对应的电压值转换为噪声电压值。

(4) 噪声等效温差 (NETD) 焦平面目标温差与焦平面信噪比之比, 是红外焦平面重要性能。根据红外焦平面测试方法, 黑体温度  $T$  和  $T_0$  下测得像元响应电压  $V_{ST}$ 、 $V_{ST0}$  和噪声电压  $V_N$ , 则  $NETD = (T - T_0) / [(V_{ST} - V_{ST0}) / V_N]$ 。数字电路中, 输出为数字码值, 分别测试  $T$  和  $T_0$  温度下  $n$  个像元输出平均码值  $CODE_T$  和  $CODE_{T0}$ , 其中  $n$  足够多, 计算输出码值的标准差为  $\sigma_0$ ,  $NETD = (T - T_0) / [(CODE_T - CODE_{T0}) / \sigma_0]$ 。

### 1.2 ADC 性能参数分析

数字焦平面读出电路输出反映探测器和读出电路整体性能, 列级 ADC 读出电路包含了输入级、采样保持等模拟电路和 ADC 数字电路。其中, 输入级、采样保持等模拟电路的性能对整体电路性能具有重要影响。ADC 的输入包含前级模拟电路的信号与噪声, ADC 输出反映了整体电路的性能, 对数字焦平面性能的评价首先要对 ADC 进行准确的测试评价。

ADC 测试可分为静态测试和动态测试。静态性能是指直流工作状态下, ADC 将模拟输入转换为数字输出的能力。静态性能的主要特性是微分非线性 (DNL)、积分非线性 (INL)、失调误差和增益误差等。其中 DNL 是测量码宽与实际码宽的差值, INL 是实际转换曲线与理想转换曲线之间的偏离度<sup>[10]</sup>, 如图 2 所示。

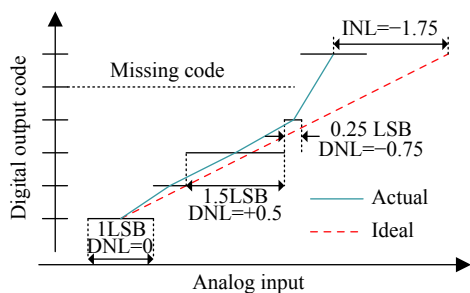


图 2 ADC 静态性能 DNL、INL 和失码

Fig.2 ADC static performance DNL, INL and missing code

动态性能衡量 ADC 在一定转换速率下的性能, 反映其交流特性, 相关参数有信噪比 (SNR)、有效位数 (ENOB)、总谐波失真 (THD)、信纳比 (SINAD) 和

无杂散动态范围 (SFDR) 等<sup>[11]</sup>。其中, SINAD 是信号功率与其他频率成分功率 (包括谐波、噪声, 但不包括直流) 之比; ENOB 表示 ADC 性能实际能达到的有效位数。SINAD 和 ENOB 是评价 ADC 动态性能的核心指标。

## 2 ADC 测试方法

### 2.1 传统静态测试方法

传统静态测试方法通过调节 ADC 输入电压, 使数字输出从  $j$  码变为  $j-1$  码和从  $j-1$  码变为  $j$  码时, 记下输入电压  $V_1$  和  $V_2$ ; 再使输出从  $j$  码变为  $j+1$  码和  $j+1$  码变为  $j$  码, 分别记下电压  $V_3$ 、 $V_4$ 。则  $j$  码的实际码宽为<sup>[12]</sup>:

$$\Delta V_j = \frac{V_3 + V_4}{2} - \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (1)$$

$j$  码实际的码宽中心值为:

$$V_j = \frac{V_1 + V_2 + V_3 + V_4}{4} \quad (2)$$

在 ADC 量程范围内, 分别测试所有码值的实际码宽和码宽中心, 将实际码宽与理想码宽  $1V_{LSB}$  相比较, 取偏差的绝对值最大者为  $|\Delta V_{DNL}|_{max}$ , 则  $DNL_{max} = |\Delta V_{DNL}|_{max} / V_{LSB}$ 。根据实际码宽, 确定最佳转换拟合曲线, 得到  $j$  码的模拟输入值为  $V_{j0}$ , 将所得的实际码宽中心值与模拟输入值相比, 得到最大偏差值  $|\Delta V_{INL}|_{max}$ , 可得  $INL_{max} = |\Delta V_{INL}|_{max} / V_{LSB}$ 。

理想情况下, ADC 静态测试可以采用上述方法得到 DNL 和 INL。由于所有 ADC 均存在量化噪声的问题, 随着 ADC 分辨率的提高, 最小量化台阶 1LSB 对应的电压值越小, 量化噪声可能达到甚至超过  $1V_{LSB}$ 。对满量程电压值为 2V 的 ADC 电路, 分辨率 12 bit 时,  $1V_{LSB}$  约为 488.3  $\mu V$ ; 当分辨率达到 16 bit,  $1V_{LSB}$  降至 30.5  $\mu V$ 。对于高分辨率 ADC, 1LSB 的输入变化电压更容易被噪声覆盖, 导致输出结果中没有相应的码值, 即 ADC 存在失码。同时, 分辨率  $N$  位的 ADC 量化台阶数为  $2^N$  个, 随着分辨率的上升, 需测试的码值数目呈指数增加, 大大增加了测试难度, 且耗费测试时间。因此, 上述传统的测试方法只适用于低分辨率的 ADC 测试评价, 对于高精度 ADC 的静态参数测试, 下文阐述一种可实际应用的静态测试方法。

## 2.2 过采样测试静态性能

过采样测试是通过多次采集输出码值来降低噪声的影响,根据输出码值的实际码宽和理想码宽计算静态性能。目前,常用的过采样测试中采用正弦波作为 ADC 的输入信号<sup>[13]</sup>,为保证每个码值均被采到,输入的正弦波频率与采样频率应为互质关系,对输入信号源的要求较高。同时,由于正弦波每个电压出现的概率不同,为了消除分布不均匀带来的误差,需要巨大的采样样本。对输出码值进行统计时,码值出现的概率与正弦波的幅值相关,输入信号幅值的变化会造成计算得到的 DNL 和 INL 存在较大的偏差。因此,采用正弦波输入信号,对测试设备要求较高,且输出码值的统计复杂、计算量大。

文中的过采样测试方法采用斜坡信号作为待测红外焦平面 ADC 芯片的输入电压,斜坡信号每个电压出现的概率相等,方便测试及统计计算,更具有实用性。

首先分析 ADC 输出码值受噪声的影响。理想情况下,输入固定直流电压值,经过 ADC 模数转换后输出的数字码值也是固定的。在实际测试环境中,测试环境的噪声和 ADC 内部量化噪声影响输出的数字码值,输出码值主要集中在模拟输入对应值的附近,也会偏差到相邻两侧的码值,当输出采样量足够多时,最后的码值分布呈现正态分布。图 3 为待测 ADC 芯片输入电压为 1.039 V 时的输出码值分布。正态分布的期望值  $\mu$ ,即理想的输出码值,噪声影响了标准差  $\sigma$ , $\sigma$  越大输出码值越分散。

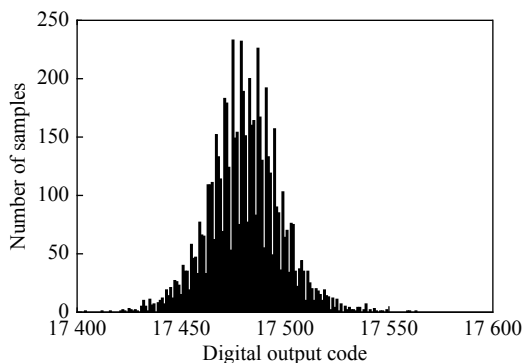


图 3  $V_{in}=1.039\text{ V}$  时实际输出码值分布图

Fig.3 Distribution of output codes at  $V_{in}=1.039\text{ V}$

采用过采样测试静态性能时,对待测 ADC 输入固定的电压值,采样  $M$  次, $M$  足够多时视为对 ADC

进行过采样。根据上述码值分布原理,假设输出码值在  $j$  码采样得到  $A$  次,在  $j-i$  码和  $j+i$  码均采样得到  $(M-A)/2, i \geq 0$ 。若噪声对所有输入电压值的影响几乎相同,可认为 ADC 所有的模拟输入的输出码值均符合上述假设,输入满量程范围电压,每个输入采样  $M$  次,最后,将所有得到的输出码值按出现次数进行统计,得到对应码值输出次数的数列为  $M_0、M_1、M_2、\dots、M_k(k=2^N-1, N$  为 ADC 分辨率)。理论上,  $M_j(0 \leq j \leq k)$  都等于采样次数  $M$ ,即所有码值的码宽都相同为  $M, M$  可看作最小量化电平 1LSB。

实际测试时,存在  $M_j$  不等于  $M$ ,该码值的微分非线性为  $DNL_j = (M_j - M)/M$ ,根据差值最大值  $|M_j - M|_{max}$  计算 ADC 最大微分非线性  $DNL_{max}$ 。积分非线性  $INL_j$  为  $j$  码以及前面所有码值  $DNL$  的总和,  $INL_j = \sum_{i=0}^j DNL_i$ ,取最大值为 ADC 最大积分非线性  $INL_{max}$ 。由此,根据测试得到的输出码值  $M_j$  可以计算 ADC 的静态参数  $DNL$  和  $INL$ 。

另外,若数列中  $M_j$  均大于 0,对分辨率为  $N$  位的 ADC,表明所有输出码值  $2^N$  个均被采样到,ADC 满足  $N$  位满量程范围内无误码,即无误码分辨率为  $N$  位。若存在某个或某些  $M_j=0$ ,则 ADC 存在一定的失码。

测试时,依据 ADC 的满量程幅值将斜坡信号等间距分成几段,根据分段大小,确定每段斜坡信号的幅值和台阶数。每小段都可看作是一个单独的 ADC,测试时输入每小段信号源幅度要大于每小段的满幅量程,最后计算时,叠加部分取平均值。每段斜坡信号经过 ADC 转换后采集输出码值并记录,统计每段的输出结果得到 ADC 满量程范围内的输出码值。为降低噪声等因素对测试结果的影响,对相同输出码进行重复统计,增加采样样本值。采样次数越大,噪声对输出码值的影响越小,测试准确率越高。

## 2.3 动态性能测试方法

动态测试方法有正弦拟合法和傅里叶变换 (FFT) 法,其中 FFT 法复杂度更低且需要的测试样本数更少,频域范围内能更全面的表现动态性能参数,是目前最常用的动态测试方法<sup>[14]</sup>。采用 FFT 法测试动态性能,待测 ADC 输入频率  $f_0$  的正弦波,采样频率  $f_s$  对 ADC 采样合适的点数  $M$ 。FFT 测试法的采样



方式可以分为相干采样和非相干采样,其中,相干采样的采样频率 $f_s$ 与输入信号的频率 $f_0$ 相关,对信号采样整周期个数的信号,FFT变换后不存在频谱泄露。实际测试中,由于信号源的限制,很难实现相干采样。一般采用非相干采样,可以减少输入信号和采样频率的约束,通过加窗处理减少频谱泄漏,常用的有汉宁窗和汉明窗<sup>[15]</sup>。

采集到的数据进行FFT处理,将时域信号转换为频域信号,由频域图可以得到信号功率 $P_s$ 、噪声功率 $P_n$ 和谐波信号功率 $P_d$ ,根据参数的定义公式计算可得SINAD和ENOB,其中:

$$SINAD = 10\log \frac{P_s}{P_n + P_d} \quad (3)$$

$$ENOB = \frac{SINAD - 1.76}{6.02} \quad (4)$$

公式(4)中SINAD是输入信号为ADC满量程幅度测量得到的。实际测试时输入非满量程的正弦波时,在计算ENOB时需要增加一个校正系数将有效位数归一到满量程,公式如下<sup>[16]</sup>:

$$ENOB = \frac{SINAD - 1.76 + 20\log\left(\frac{FSR}{AM}\right)}{6.02} \quad (5)$$

式中:FSR为ADC满量程幅值;AM为实际测试输入的正弦信号幅值。

### 3 测试系统的软硬件设计

高速高精度ADC的性能测试,对测试平台有较高的要求,在确定合适的测试方法后,搭建测试平台至关重要。该套测试系统的示意框图如图4所示,同

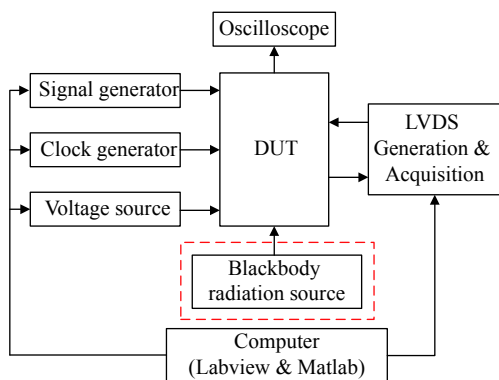


图 4 测试系统示意框图

Fig.4 Schematic block diagram of the testing system

时满足ADC性能测试和红外焦平面性能测试,主要结构有被测芯片、黑体辐射源、高精度模拟信号发生源、时钟发生器、LVDS数字采集卡、电压源、计算机程序控制和示波器。其中,黑体辐射源在测试红外焦平面器件时提供不同的黑体温度。模拟信号源为ADC测试提供输入信号,设备内置分辨率高达24 bit的DAC,可产生高精度直流电压、斜坡电压和正弦波电压。LVDS数字采集卡可以生成芯片所需的工作时序,同时采集芯片输出的数字信号,能传输0~200 MHz的LVDS信号,满足ADC数字信号高速传输。电路测试PCB板的设计中,待测ADC芯片所需参考电平由稳压芯片提供,所用稳压芯片输出电压噪声峰峰值为3.4 μV,满量程为2 V的19 bit ADC电路 $1V_{LSB}=3.8 \mu V$ ,该测试平台满足16 bit ADC的测试要求。

该套测试系统可同时满足ADC静态性能和动态性能的测试要求。根据不同的测试需求,模拟信号源发射相应的输入信号,输入信号经过待测红外焦平面ADC芯片输出串行数字信号,由采集卡采集数据并保存到计算机中。利用Matlab软件进行数据处理,得到相应的测试结果<sup>[17]</sup>。

除了硬件系统的搭建,软件编制也是测试平台搭建的重要部分,软件的合理设计可以显著提高测试效率减少测试时间。基于美国NI公司的虚拟开发软件Labview软件搭建了软件测试平台<sup>[18]</sup>。软件设计主要有三部分模块,包括参数设置模块、数据采集模块和数据保存/显示模块。参数设置模块控制电源电压、时钟频率和信号源波形。基于不同的性能测试,Labview软件编制输入信号类型可选,包括直流电压、斜坡电压和正弦波电压。同时可设置直流电压大小、斜坡幅度和台阶电压大小、正弦波幅值和频率,满足不同测试需求。数据采集模块设置采集时序与ADC读出一致,保证串行读出数据的正确性,并设置数据读出模式,和输出信号灰度图显示模式。数据保存/显示模块将采集到的数据保存在计算机文件夹中,数据全部读取完全之后以灰度图显示,并且设置X、Y轴位置信息,实时监控某个像元位置的输出信号。Labview软件设计前面板如图5、6所示。

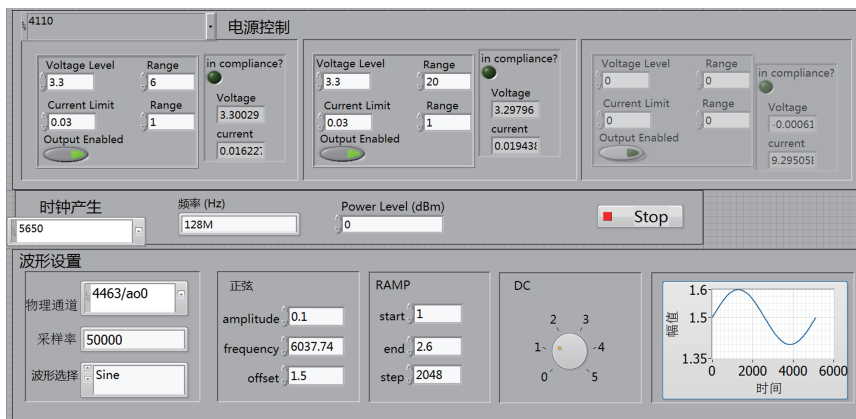


图 5 Labview 软件设计前面板 (参数设置模块)

Fig.5 Front panel of Labview( parameter setting module)

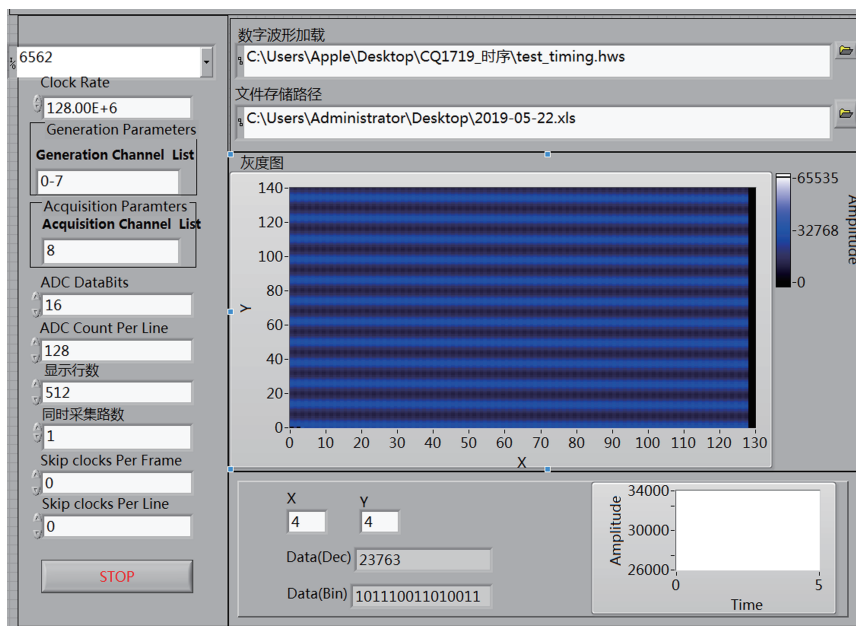


图 6 Labview 软件设计前面板 (数据采集模块和保存显示模块)

Fig.6 Front panel of Labview (data acquisition module and display module)

### 4 测试结果

对一款红外焦平面数字读出电路进行测试评价, 电路集成单斜率积分型 ADC, 分辨率 12~16 bit 可调。电路设计指标静态无误码分辨率大于 12 bit,  $|DNL| < 1 \text{ LSB}$ ,  $|INL| < 1.5 \text{ LSB}$ , 动态有效位数  $ENOB > 12 \text{ bit}$ 。利用文中所阐述的测试方法首先对电路 ADC 进行测试评价。ADC 静态测试输入将 0.3~2.6 V 的斜坡电压分为电压范围 0.1 V 的小段, 单位台阶电压约 35  $\mu\text{V}$ 。测试时对每个台阶电压重复采样 16 次, 最终输出码值在 20~48 999 范围内无误码, 无误码分辨率为

15.5 bit, 根据实际采样次数和平均采样次数计算每个码值的 DNL 和 INL, DNL、INL 曲线如图 7 所示, 其中最大微分非线性  $DNL_{\text{max}} = 0.920 \text{ 4LSB}$ , 最小微分非线性  $DNL_{\text{min}} = -0.759 \text{ 9LSB}$ , 最大积分非线性  $INL_{\text{max}} = 1.420 \text{ 8LSB}$ , 最小积分非线性  $INL_{\text{min}} = -1.309 \text{ 8LSB}$ 。可得, ADC 的  $|DNL| < 1 \text{ LSB}$ ,  $|INL| < 1.5 \text{ LSB}$ 。

静态测试中, 无误码分辨率与采样次数相关, 利用过采样技术对信号进行多次采样, 降低了噪声的影响, 能有效提高无误码分辨率。电路进一步测试中, 待测芯片达到 14 bit 分辨率重复采样 6 次, 达到 12 bit 分辨率平均采样 3 次。为提高静态分辨率, 需

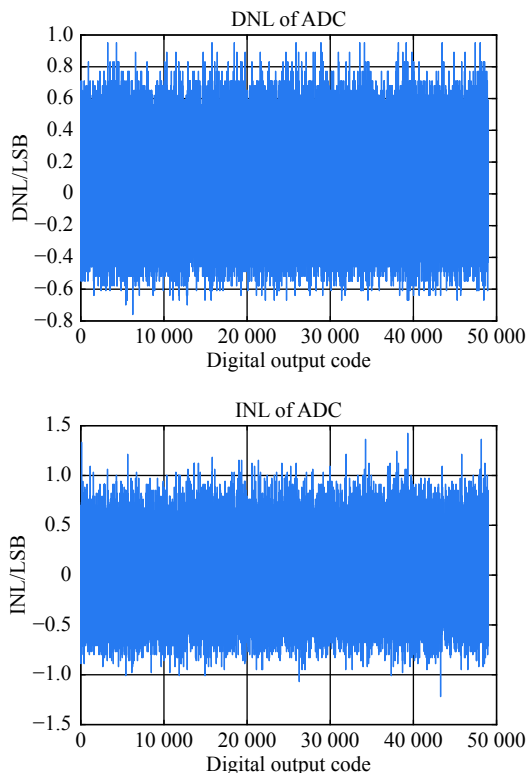


图 7 DNL 和 INL 曲线  
Fig.7 DNL and INL curves

要提高采样速率和更多的存储空间。实际应用中应折中考虑分辨率和采样速率。

该读出电路应用到 1 024×1 024 面阵焦平面数字读出, 时钟频率 128 MHz, 读出一个码值的时间为 125 ns, 则面阵帧频为 7.63 Hz。动态测试时输入频率为 9.6 Hz、幅值为 0.5 V 的正弦波, 采样率为 2.36 kHz, 采样得到的输出信号时域图如图 8, FFT 变换后得到如图 9 的频谱图。根据频谱图得到 SINAD 为 67.19 dB, 利用公式 (5) 计算有效位数 ENOB=12.07 bit。

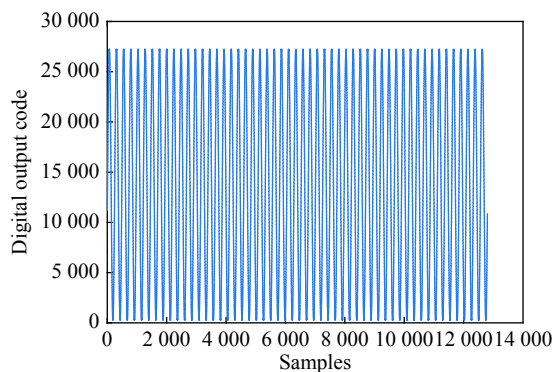


图 8 输出信号时域图

Fig.8 Time domain diagram of digital outputs

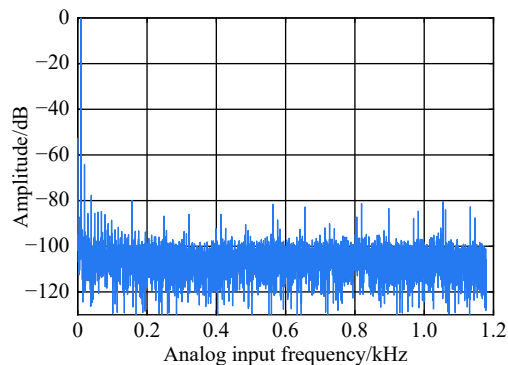


图 9 输出信号频谱图

Fig.9 Frequency domain diagram of digital outputs

将读出电路芯片与探测器进行互联, 并置于低温杜瓦中, 面源黑体辐射源提供一定的温度照射探测器, 探测器产生电流经数字读出电路转为数字输出。对整体数字读出电路进行测试评价, 固定黑体温度 308 K 下采集不同积分时间的输出码值, 每个积分时间重复采集 64 次, 取平均值作为最终的实际输出。积分时间在 20~532  $\mu$ s 之间取 15 个点, 输出码值范围 1 566~42 896, 线性度大于 99.99%, 整体电路功能正常且线性度良好。该测试平台实现了红外焦平面数字读出电路的测试, 有效评价了电路性能, 有利于电路的进一步优化设计。

## 5 结 论

随着红外焦平面读出电路数字化的不断发展, 准确评价数字化读出电路性能成为一个测试难题。文中基于 ADC 电路的传统测试方法, 阐述了适用于红外焦平面高速高精度行列级 ADC 电路的测试方法, 为了减少测试过程中量化噪声对 ADC 的影响, 利用过采样原理多次采集码值提高静态测试准确性。最后, 综合静态测试和动态测试原理搭建了软硬件测试平台, 该测试平台通用性好、测试速度快、操作简单。最终对一款红外焦平面数字电路进行了测试评价。测试结果显示文中测试方法和测试平台能有效对红外焦平面电路进行测试评价, 适合应用于行列级 ADC 数字电路的测试, 具有实际工程应用的价值。

## 参考文献:

- [1] Markovitz T, Shtrichman I. Megapixel digital InSb detector for mid-wave infrared imaging [J]. *Optical Engineering*, 2011,

- 50(6): 409–421.
- [2] Michel V. Latest developments of cooled infrared detectors at Sofradir, France [J]. *Defence Science Journal*, 2013, 63(6): 550–554.
- [3] Kenneth I, Michael W, Justin J, et al. Digital-pixel focal plane array technology [J]. *Lincoln Laboratory Journal*, 2014, 20(2): 36–51.
- [4] Yin Shichang, Yu Songlin, Yu Yan. New digitalized ROIC for linear TDI IRFPA [J]. *Laser & Infrared*, 2013, 43(5): 540–543. (in Chinese)  
尹士畅, 喻松林, 于艳. 一种应用于线列TDI型红外焦平面的数字化读出电路[J]. *激光与红外*, 2013, 43(5): 540–543.
- [5] Gao Lei, Zhai Yongcheng, Liang Qinghua, et al. IRFPA ROIC integrated digital output [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(6): 1686–1691. (in Chinese)  
高磊, 翟永成, 梁清华, 等. 红外焦平面读出电路集成数字输出[J]. *红外激光与工程*, 2015, 44(6): 1686–1691.
- [6] Bai Piji, Zhao Jun, Han Fuzhong, et al. Review of digital mid-wave infrared focal plane array detector assembly [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(1): 0102003. (in Chinese)  
白丕绩, 赵俊, 韩福忠, 等. 数字化中波红外焦平面探测器组件研究进展[J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(1): 0102003.
- [7] Yang S, Luo L, Lu W, et al. A 16-bit two-step pixel-level ADC for 384\*288 infrared focal plane array [C]//2017 IEEE 12th International Conference on ASIC (ASICON). IEEE, 2017.
- [8] He Li, Yang Dingjiang, Ni Guoqiang, et al. Introduction to Advanced Focal Plane Arrays [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011. (in Chinese)  
何力, 杨定江, 倪国强, 等. 先进焦平面技术导论 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
- [9] Reibel Y, Rubaldo L, Bonnouvrier G, et al. Latest developments in advanced MCT infrared cooled detectors [C]//Proceedings of SPIE, 2011, 8185(4): 818503.
- [10] Duan J, Jin L, Chen D. Testing ADC spectral performance without dedicated data acquisition [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2012, 61(11): 2941–2952.
- [11] Agrez, D. Analysis of the residual spectrum in ADC dynamic testing [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2009, 58(3): 506–511.
- [12] 中国航天工业总公司七七一所. 半导体集成电路数/模转换器和模/数转换器测试方法. QJ 3044-1998[S]. 北京: 行业标准-航天(CN-QJ), 1998.
- [13] Maxim Integrated, Histogram Testing Determines DNL and INL Errors[EB/OL]. [2003-06-18]. <https://www.maximintegrated.com/en/app-notes/index.mvp/id/2085>
- [14] Xu L, Sudani S K, Chen D. Efficient spectral testing with clipped and noncoherently sampled data [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2014, 63(6): 1451–1460.
- [15] Rebai C, Dallet D, Marchegay P. Non coherent spectral analysis of ADC using filter bank[C]//Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2002.
- [16] Engineer A D I. Data Conversion Handbook - Analog Devices Inc[Z]. Data Conversion Handbook. 2013.
- [17] Dan Lan, Jiang Yanfeng, Liu Wenkai. Testing research based on Matlab for high-speed and high-resolution ADC [J]. *Computer Measurement & Control*, 2010, 18(9): 2044–2045, 2049. (in Chinese)  
戴澜, 姜岩峰, 刘文楷. 基于Matlab的高速高精度ADC测试研究[J]. *计算机测量与控制*, 2010, 18(9): 2044–2045, 2049.
- [18] Fexa P, Vedral J. Developing automated data acquisition system for ADC and DAC testing[C]//Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IDAACS), 2011 IEEE 6th International Conference on, 2011.