

文章编号: 1672-8785(2017)07-0031-06

基于开关电容阵列的高速多元 激光回波数字化技术

于祥吉 王海伟 丁宇星 黄庚华

(中国科学院上海技术物理研究所中国科学院空间主动光电技术重点实验室, 上海 200083)

摘 要: 设计了基于新型开关电容阵列技术的激光回波数字化系统, 实现了每秒 5G 个采样点 (Gigabit Samples per Second, GSPS) 的采样速率。利用单片模拟数字转换器件 (Analog Digital Converter, ADC) 实现了多元信号采样。该系统具有很大的发展潜力。介绍了多米诺环形采样器 (Domino Ring Sampler, DRS)4 的控制策略。设计了基于 DRS4 芯片的激光回波数字化电路, 搭建了激光测试系统, 并开展了基于 DRS4 的信号采样实验。实验结果表明, 采用 DRS4 芯片进行激光回波数字化, 能够达到最高 5GSPS 的采样速率, 可实现多元系统设计, 增大视场, 同时降低系统功耗和成本。

关键词: 激光测距; 开关电容阵列; 回波数字化

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2017.07.005

High-Speed Multichannel Laser Echo Wave Digitizing Technology Based on Switched Capacitor Array

YU Xiang-ji, DING Yu-xing, WANG Hai-wei, HUANG Geng-hua

(Key Laboratory of Space Active Optoelectronics Technology, CAS, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: A laser echo digitizing system based on a new switched capacitor array technology was designed. By using the system, the sampling rate of 5 Gigabit samples per second was achieved. Multichannel sampling was realized by using a single chip analog digital converter. The system had a great potential for development. A laser echo digitizing circuit based on DRS4 chips was designed, a laser testing system was built and the signal sampling experiment based on DRS4 chips was carried out. The results showed that the laser echo digitizing circuit could obtain a sampling rate of 5 Gigabit samples per second, could realize multichannel sampling, could increase the field of view and could reduce the power consumption and cost of the system.

Key words: laser ranging; switched capacitor array; echo digitization

收稿日期: 2017-03-27

基金项目: 国家 863 计划 (2015AA123801)

作者简介: 于祥吉 (1992-), 男, 硕士研究生, 内蒙古人, 主要从事激光雷达回波数字化技术研究。

E-mail: yuhaiyang421@163.com

* **通讯作者:** 王海伟 (1982-), 男, 博士研究生, 河北人, 主要从事激光测距雷达研究。 E-mail:wanghaiwei@mail.sitp.ac.cn

0 引言

在激光雷达系统中,回波波形数字化技术可以应用于检波前平均、全波形分析和复杂目标探测中^[1,2]。传统的多元激光雷达大多采用高采样率的 ADC 芯片来实现激光回波数字化。激光脉冲的脉宽一般在纳秒量级,当探测目标较为复杂时,激光回波波形将会展宽甚至变形。当脉冲宽度展宽至数十纳秒时就需要用高速 ADC 进行采样。现有的高速 ADC 可以实现单通道 1GSPS 左右的采样速度^[3]。但是随着激光雷达探测元数的增加,系统的功耗、成本和设计的复杂度也随之急剧增加。

为了获得更大的视场,需要设计能实现百元以上的激光雷达。如果采用传统的高速 ADC 来实现回波信号数字化,每一元都需要相应的高速 ADC 芯片。这样,系统的功耗、成本和设计的复杂程度就决定了单板采样元数的上限。若想实现百元以上的设计,激光回波数字化部分电路已经无比庞大。随着技术的进步,许多科研人员开始考虑新的 AD 采样技术路线,开关电容阵列技术(Switched Capacitor Array, SCA)就是其中的一种,它通过模拟信号获得高速采样存储,再配以合适速度的 ADC 芯片来实现高采样速率^[4]。

将 SCA 技术应用到多元激光雷达中,能够实现百元以上的激光雷达设计,极大地提高激光雷达的探测能力和测距精度,同时提高激光回波数字化的采样速率,使激光回波能够更详细地反映地物特征。SCA 技术的优点是高速模拟信号采样再读出的方式,实现最高 5GSPS 的采样速率,大大降低多元激光雷达对功耗、成本的要求,实现多元激光雷达的设计,增大探测视场,提高探测能力。

1 SCA 采样技术原理

1.1 SCA 芯片选型

目前,已经有几款较成熟的 SCA 芯片,其中,DRS 是其中的典型代表。DRS 芯片由瑞士的保罗谢尔研究所(Paul Scherer Institute, PSI)研发,到目前为止已经有五个版本,分别是 DRS1、

DRS2、DRS3、DRS4 和 DRS5。DRS4 是目前 DRS 芯片中技术最成熟、应用较广泛的一款。DRS4 最初多用于粒子物理实验中,用以实现波形的数字化^[5]。

DRS4 芯片共有 9 个差分输入通道,采样速度最高可以达到 5 GSPS,其中每个通道有 1024 个采样单元,用于存储电荷,其模拟带宽为 950 MHz。此外,DRS4 的信噪比(Signal Noise Ratio, SNR)高达 69 dB。DRS4 通道间可以级联,以增加采样深度;多片芯片可以并行使用,以实现更多通道的 AD 采样。

图 1 是典型 SCA 芯片 DRS4 的内部电路原理框图。电路主要由反相器链路(即 Domino 环)和采样电容阵列两部分组成。DRS4 不需要外接高速采样时钟信号,其内部的 Domino 环能够产生最高达 6 GHz 的采样频率,并能控制电容阵列开关的开和闭。输入信号在采样信号的控制下被电容阵列采样,将电荷存储在电容中。存储的电荷通过芯片中的读移位寄存器,由外部的 ADC 进行读出^[6]。

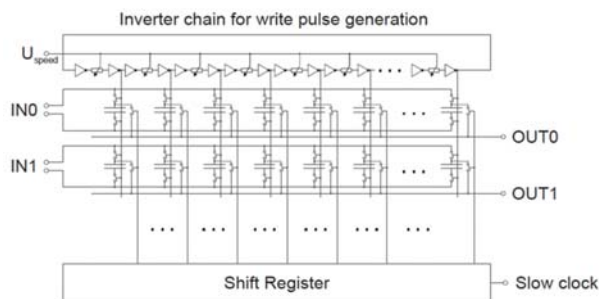


图 1 SCA 芯片内部电路的原理框图

1.2 DRS4 控制策略

在 DRS4 芯片中,Domino 环有无限震荡和单次震荡两种工作方式。在无限震荡模式下,Domino 环会一直循环工作直到采样结束。在单次震荡模式中,Domino 采样信号从第一个单元传输到最后一个单元后自动停止。在无限震荡模式中,可以由 DRS4 的 DTAP 信号监测 Domino 环的采样速率。DTAP 信号的作用是,Domino 环每次到达第 512 个单元时,DTAP 信号的电

平翻转。因此, Domino 环的采样速率 f_{Domino} 和 DTAP 的速率 f_{DTAP} 之间的关系为

$$f_{DTAP} = \frac{1}{2048} \times f_{Domino} \quad (1)$$

DRS4 芯片内部设计有锁相环 (Phase Locked Loop, PLL), 它可以将 DTAP 信号反馈到内部的 PLL 中, 通过比较参考时钟的频率和相位关系来调整 Domino 环的采样速率。如果参考时钟信号与 DTAP 信号的频率和相位关系相同, 就能实现需要的 Domino 环采样速率。

DRS4 共有 9 个通道, 每个通道的采样深度为 1024, 前八个通道用于采样模拟信号, 第九个通道用于采样公共时钟信号, 实现多片 DRS4 的同步。八个模拟信号采样通道可以通过芯片内部串接和多片 DRS4 的级联, 实现更大深度的模拟信号采样。

DRS4 对模拟信号采样后, 由控制逻辑读出, 并被送入到后方的 ADC, 以实现数字化。DRS4 的最佳读出速度是 33 MHz, 因此, 读出 1024 个单元所需时间约为 30 μ s。为了降低读出的死时间, DRS4 支持感兴趣区域 (Region-of-Interest, ROI) 读出模式。在这种模式中, 不需要对全部 1024 个采样单元进行读出, 只需要读出其中需要的部分, 大大降低了死时间。

2 基于 DRS4 的波形数字化系统设计

为了将基于 DRS4 的波形数字化技术应用到激光测距系统中, 设计了一个基于 DRS4 的原理验证系统。利用该系统对 DRS4 的工作原理和特性进行研究, 并搭建初步的激光测试系统, 以便对 DRS4 的性能进行验证。

基于 DRS4 的波形数字化系统框图如图 2 所示。由于 DRS4 芯片内部不集成 ADC, 需要用外接的 ADC 芯片对 DRS4 的采样电荷进行读出。外部的模拟信号经过模拟前端处理输出到 DRS4, 进行模拟采样, DRS4 在现场可编程门阵列 (Field - Programmable Gate Array, FPGA) 芯片产生的控制信号作用下循环采样; 将采样电荷存储在电容阵列里; 当外部触发信号到来时,

DRS4 暂时停止采样, 电容阵列中存储的电荷被保持, 并依次送入到读出移位寄存器中, 由 ADC 进行数字化;

以 FPGA 为核心的数字处理单元收到的 ADC 数字化结果后, 由高速以太网传输到计算机, 进行后续的处理和分析。

此外, 外部时钟单元的作用是为电路中各个器件提供高质量的时钟信号, 并控制各时钟信号之间的相位关系。校准单元的作用是为电路中各个器件提供精确的控制电压, 如模拟前端运放所需的偏置电压及 DRS4 所需的控制电压等。

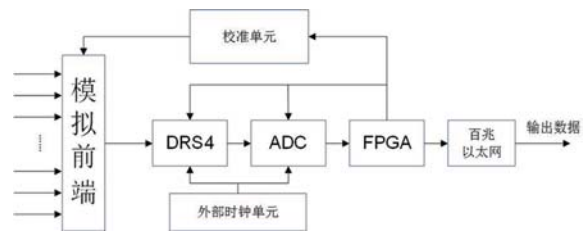


图 2 DRS4 的电路原理图

电路中共有 8 个外部待采样模拟信号输入通道, 信号由电缆连接器 (Sub-Miniature-A, SMA) 输入到电路中, 将 DRS4 芯片设置为 8 个通道独立工作模式, 每个通道的采样深度为 1024。DRS4 的每个通道都需要独立的前端运放来处理输入的模拟信号。考虑到 DRS4 芯片要求输入的模拟信号为差分信号, 并且对输入信号的电压范围有严格的要求, 因此需要由模拟前端对外部输入信号进行处理, 将单端信号转换为差分信号, 并对差分信号的共模电压和差模电压进行调整, 使其满足 DRS4 芯片的输入要求。此外, 还需保证外部输入信号有足够的驱动能力, 以满足 DRS4 芯片高采样率的要求。

运放单端信号输入、差分信号输出的电路如图 3 所示。假设输入为源阻抗 R_s 、增益控制阻抗 R_3 、反馈电阻 R_4 、运放增益 $G^{[7]}$, 考虑差分运放的平衡性, 则有:

$$R_2 = R_4 \quad (2)$$

$$R_1 = R_3 + (R_t \mathbf{P} R_s) \quad (3)$$

$$G = \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} \quad (4)$$

将图 3 中的电路进行戴维南等效,可以得到:

$$G = \frac{2R_t}{R_t + R_s} \times \frac{R_2}{R_1} \quad (5)$$

由式 (5) 可知,根据所需的放大倍数即可确定各个电阻的阻值。此外,DRS4 芯片的最佳电压输入范围为 0.1 V 至 1.5 V。因此,需要根据输入信号的范围调整转换后差分信号的共模电压至 0.8 V,使其满足 DRS4 的输入要求,保证 DRS4 工作在线性状态。

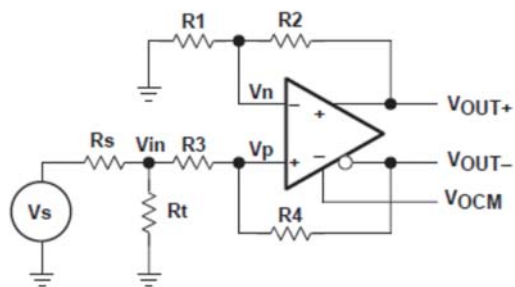


图 3 单端信号转差分信号的电路原理图

考虑到 DRS4 芯片的带宽为 950 MHz、综合驱动能力等因素,选择德州仪器 (Texas Instruments, TI) 公司的 THS4508 作为模拟前端部分的运放,其带宽为 700 MHz。DRS4 芯片的信噪比高达 69 dB,最佳读出速度为 33 MHz。结合这

两点,选择 ADI 公司生产的单通道 14 位 ADC、AD9245,输入电压动态范围为 2 V,这和 DRS4 的输出电压的动态范围相吻合,因此可以直接将 DRS4 的输出与 ADC 芯片的输入相连接。

3 系统测试结果分析

以设计的波形数字化电路为核心,搭建了电路测试系统。在测试中,模拟信号源的获取方式有两种:信号发生器产生的模拟信号和光电探测器输出的电信号。获得采样结果后,将波形数字化电路获得的结果与商业示波器的采样结果进行比较和分析。

3.1 正弦波信号采样分析

首先由信号发生器产生正弦波。产生的信号分别由 DRS4 波形数字化系统和示波器采样。信号发生器选用安捷伦公司的脉冲函数任意噪声发生器 81150A,它能够产生高精度的任意波形信号。示波器选用安捷伦公司的 DSO9104A,其采样速率为 20 GSPS,带宽为 1GHz。产生的正弦波幅值为 1 V,频率为 10 MHz,周期为 100 ns。

对正弦波采样的结果如图 4 所示。黑色曲线是 DRS4 波形数字化电路的采样结果,蓝色曲线

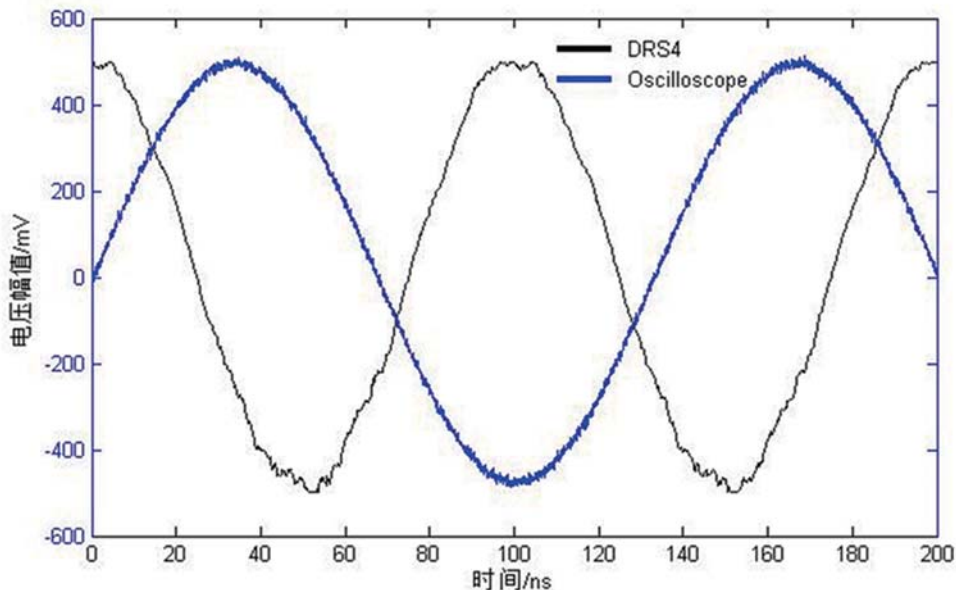


图 4 正弦波信号的采样结果

是安捷伦示波器的采样结果。DRS4 采样的频谱图如图 5 所示。对比采样结果, 由图 4 可知, DRS4 采样结果的信号幅值为 1 V, 频率为 10 MHz, 与示波器的采样结果相同, 二者波形的形状及变化趋势均一致。由 DRS4 采样结果的频谱图可以看出, DRS4 采样信号主要集中在频率 10 MHz 附近, 有一定的高频杂波。两者的区别

在于示波器的采样结果较平滑, 而 DRS4 的采样结果有一些毛刺。这是由于示波器的采样速率高、带宽为 1 GHz 造成的; DRS4 芯片的采样速率为 1 GSPS, 但是其模拟带宽低于示波器, 导致采样结果的部分高频分量缺失, 波形有小范围抖动。

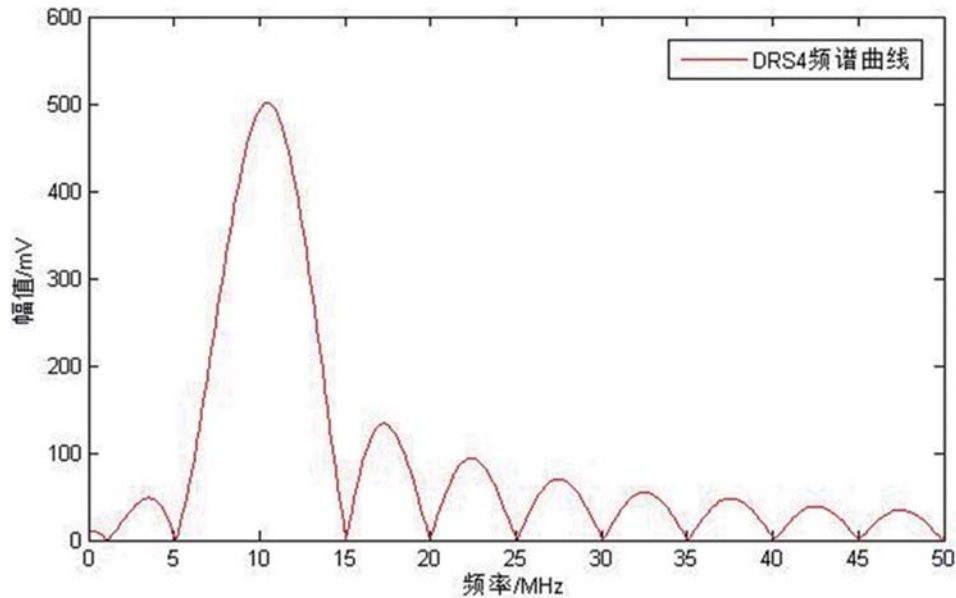


图 5 DRS4 正弦波采样的频谱分析

3.2 光电探测器信号采样分析

光电二极管是激光测距系统中常用的一种光电探测器, 它的优点在于其动态特性较好, 偏压较低, 且暗电流较小。先用激光器照射光电二极管, 光电二极管的输出电信号经电路放大和滤波后, 输入数字化系统以进行采样^[8]。测试时用激光信号照射光电二极管, 该激光信号与激光测距系统中的激光回波信号的特征基本一致, 因此可被用于 DRS4 激光波形数字化系统的性能验证。

分别用安捷伦示波器和 DRS4 波形数字化系统进行采样。结果如图 6 和图 7 所示。图 6 是 DRS4 的采样结果, 图 7 是示波器的采样结果。DRS4 的采样速率为 1 GSPS, 示波器的采样速率为 20 GSPS。DRS4 的采样结果显示, 信号幅

值为 179.3 mV, 脉冲宽度为 83 ns, 其中上升时间为 15.85 ns。示波器的采样结果显示, 信号幅值为 189.17 mV, 脉冲宽度为 84 ns, 其中上升时间为 16.00 ns。示波器的采样结果比 DRS4 的采样结果更平滑, 但二者的变化趋势基本一致。由于示波器的采样速率较高, 且带宽为 1 GHz; DRS4 的采样速率为 1 GSPS, 带宽为 700 MHz, 导致采样结果的部分高频分量缺失, 波形有一些毛刺。

4 结束语

将 DRS4 芯片应用到激光回波数字化中, 能降低数字化系统的功耗, 提高采样速率等, 能实现多元激光雷达的探测, 是一种新型的激光雷达回波数字化技术。主要研究了 DRS4 芯片的控

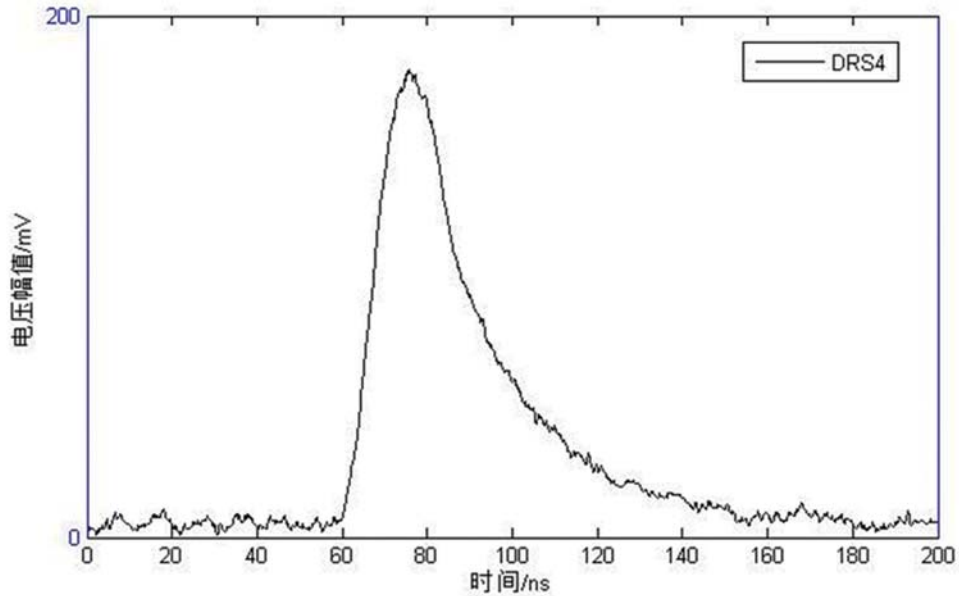


图 6 激光信号 DRS4 的采样结果

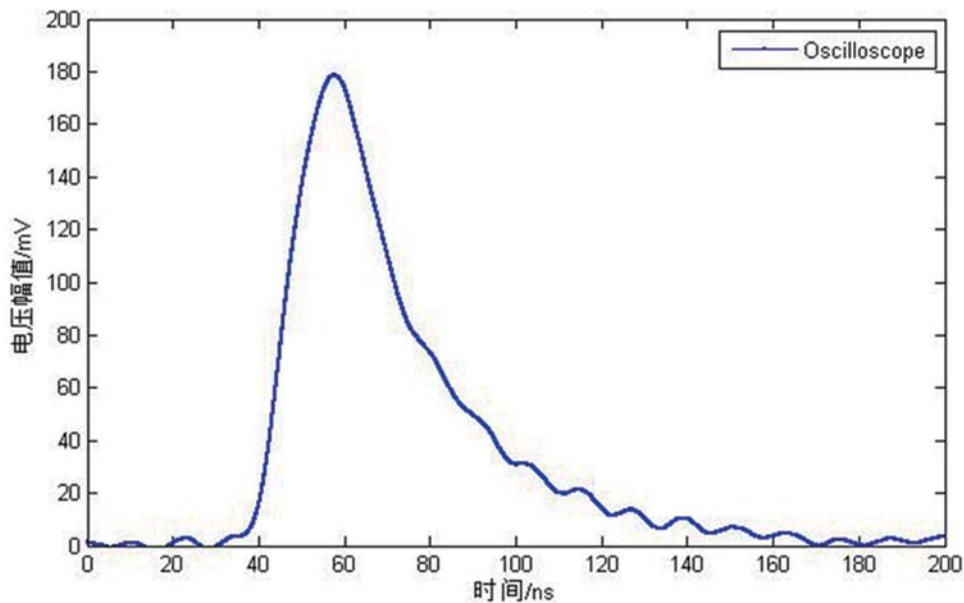


图 7 激光信号示波器的采样结果

制策略,并在此基础上完成了基于 DRS4 的多元激光回波数字化系统设计。该系统可以实现最高 5 GSPS 的采样速率,单板 8 个通道能够同时采样。分别对信号发生器产生的正弦信号和光电二极管输出的脉冲信号进行了测试,将测试结果与商用示波器进行了对比。DRS4 的采样结果与商用示波器的幅值和频率相同,波形的变

化趋势一致,采样结果较好。利用 DRS4 数字化电路及测试系统很好地实现了高速多元激光雷达回波数字化系统的设计。进一步的工作将会研究 DRS4 芯片时间及幅度的校准,以提高其采样的有效位数,并以此波形数字化系统为基础,完成 360 元激光雷达回波数字化系统的设计。

(下转第 41 页)