

doi: 10.3788/gzxb20124108.0967

基于 FPGA 的激光雷达高速数据采集系统设计

辛文辉, 李仕春, 华灯鑫, 宋跃辉, 狄慧鸽, 周智荣

(西安理工大学 机械与精密仪器工程学院, 西安 710048)

摘要:为了对激光雷达的回波信号进行采集,设计了一款基于 FPGA 的高速数据采集、预处理系统.该系统以 FPGA 内嵌 DRAM 作为存储器,以同步有限状态机作为控制方式,可在 1 kHz 的外触发信号激励下,以 20 MHz 的采集频率采集数据,并可在不丢失脉冲的情况下,对采集到的 4 096 个数据点进行 5 000 次以上的对应点累加平均(滤除背景噪音).设计完成的数据采集系统已应用于一台米散射激光雷达系统中,达到了 30 km 探测距离、7.5 m 时空分辨率的设计要求.

关键词:激光雷达;回波信号;高速数据采集;同步状态机;双端口 RAM

中图分类号: TN958.98

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2012)08-0967-5

0 引言

激光雷达是一种新型主动式遥感器,广泛应用于激光大气传输、全球气候预测、大气颗粒及气溶胶探测等领域^[1-2].激光雷达回波信号的数据采集是激光雷达系统中重要的一部分,是大气气溶胶反演的数据基础,直接影响激光雷达的时空分辨率等重要技术指标.尽管目前市面上有功能强大、性能指标很高的采集板卡可供选择,但这些板卡均是基于 PCI 总线的通用采集卡,需在工控机驱动程序的控制之下启动数据采集、处理^[3].这种板卡在底层驱动程序很不透明的情况下,很容易出现丢脉冲的现象.因此,不能完全满足激光雷达特定的数据采集要求(触发后进行多数据点高速采集,并要进行快速预处理,不遗漏脉冲).另外一方面,随着大气气溶胶探测技术的发展,将来的高光谱分辨率激光雷达将需要对 2 路、4 路,甚至 8 路的回波信号进行同步采集,而目前市面上基本没有满足如此要求的采集板卡.

针对以上问题,本文在国家“863”计划项目的支持下,设计了一款可独立运行、基于 FPGA 的激光雷达数据采集系统,可对激光雷达的回波信号进行高速采集,在不丢失脉冲的情况下可对多次采样结果进行对应点累加求平均,并可将采集到的数据以 TCP/IP 协议方式,通过网络远程传输数据(不需现场工控机).该数据采集系统具有体积小(20 cm × 20 cm),重量轻,性价比高、可扩展(可扩展至 8 通道,并且不影响采用频率)的特点,可作为激光雷达

的通用的数据采集设备推广使用.鉴于篇幅,本文仅论述数据采集、预处理的时序实现,对模数转换、采样准确度及误差分析等将另文描述.

1 激光雷达组成

图 1 是进行大气气溶胶探测时使用的米散射激光雷达系统.工作时,激光器发射的微脉冲激光光束经准直扩束后,垂直射入大气,与大气中的气溶胶粒子相互作用,其后向散射光被望远镜接收形成回波光信号.回波光信号经小孔光阑、窄带滤光片、透镜聚焦后耦合进入光纤中,再由光电倍增管(PMT)接收放大后形成回波电信号(以下简称回波信号)^[4].回波信号输入到激光雷达数据采集系统中,数据采集系统在激光器输出的微脉冲同步触发信号的激励下,每发出一束激光微脉冲,启动一次回波信号的数据采集(采集数千个点的数据),在进行必要的预处理

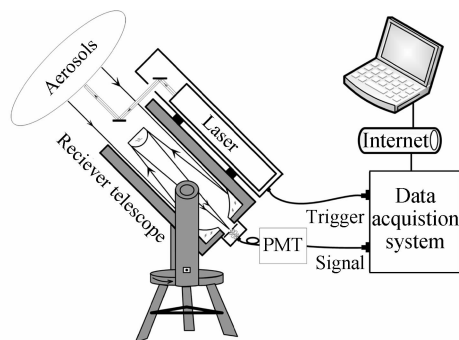


图 1 激光雷达系统结构

Fig. 1 System overview of laser radar

理后,采集到的数据传输到上位机进行进一步的反演和分析,进而可获得大气中气溶胶的分布情况^[5-6].

2 回波信号采集需求分析

激光雷达回波光信号具有动态范围大(以距离平方衰减)、光速传播的特点^[7].将光信号转换成电信号后对其采集时,须满足特定的时序需要,下面结合“863”计划项目的具体指标(空间分辨率 7.5 m、探测距离 30 km),对激光雷达回波信号的采集要求进行分析.

2.1 采样频率高

一般地,激光雷达的激光器将以 1 kHz 的频率,发出脉宽约 7 ns 的光脉冲.为了达到空间距离分辨率为 7.5 m 的设计要求,设定的采样间隔 t 应为

$$t = \frac{2d}{c} = \frac{2 \times 7.5}{3 \times 10^8} = 50 \times 10^{-9} \quad (1)$$

式中, d 为空间分辨率,由于待测的信号是一个反射信号,存在回程,所以距离要乘以 2; c 为光速.由此得到采样间隔为 50 ns,采集频率为 20 MHz.此外,由上式可知,要获得的较高的空间分辨率,采样频率必须足够的高.

2.2 采样点数多

为了达到探测距离是 30 km 的要求,采样点数 n 为

$$n = \frac{L}{d} = \frac{30 \times 10^3}{7.5} = 4 \times 10^3 \quad (2)$$

式中, L 为探测距离, d 空间距离分辨率.所以,采用点数要达 4 000 次以上.故探测距离越远,采样点数越多(为了和 PGGA 的存储器容量相配合,将采集的数据点数设置为 4 096).

2.3 需对采样结果进行对应点累加求平均

激光雷达回波信号含有众多杂乱无章的背景噪音,为去除这些噪音,需对采集结果进行上千次(5 000 次以上)的对应点累计平均以去除背景噪音^[4].

图 2 是按以上分析得到的激光雷达的采集时序要求图.激光雷达每隔 1 ms(即 1 kHz 的频率)发出一个激光微脉冲,采集系统在与微脉冲同步的触发信号激励下,对回波信号启动一次 4 096 个数据点的采集.下一个触发信号来临时,再启动新的采集.为了去除背景噪音,需要对 5 000 次以上 4 096 个数据点进行对应点相加求平均.

由图 2 激光雷达系统时序图可知,在触发信号的控制下,以 20 MHz 的采样频率,进行 4 096 次的数据采集,并不存在技术上的难度.而问题的关键在于要对上千次 4 096 个数据进行对应点相加求平均,并且采集和处理时间不能超过 1 ms,否则,会遗

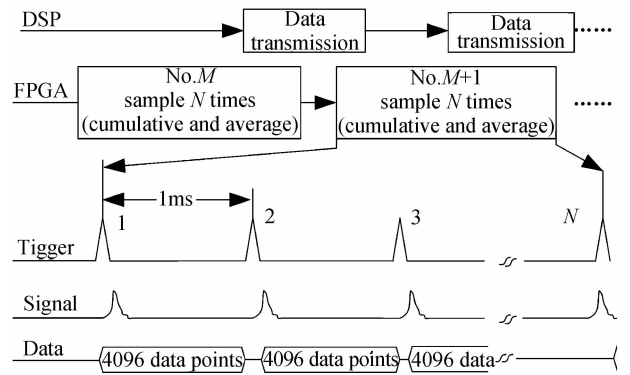


图 2 激光雷达回波信号时序图

Fig. 2 Sequence diagram of echo signal

漏掉下一次回波信号或对应数据点相加出错,这将严重影响激光雷达的性能指标.这也正是目前通用数据采集板块应用于激光雷达回波信号采集普遍存在的问题,也是本文要解决的关键问题之一.

3 系统设计及实现

针对以上关键问题,本文设计了以 FPGA + DSP 的数据采集系统.数据采集由可并行执行、时序逻辑控制能力强的 FPGA 完成,数据反演和传输由 DSP 完成.至于对上千次的 4 096 个数据进行对应点相加求平均,有两种方案可供选择:

方案 1:在一次 4 096 个数据点的采集任务结束后,由 DSP 在 0.8 ms 内(采集 4 096 个数据的时间: $4\,096 \times 50 \text{ ns} \approx 0.2 \text{ ms}$)将 4 096 个数据读入 DSP 存储器暂存,等 N 次采集任务结束后,由 DSP 将 N 个暂存的 4 096 次进行对应点相加再求平均.

方案 2:在 FPGA 的采集时序上再设计必要的数据存取和算术运算模块,每采集一个数据点,将其结果与上次累加结果相加并存储,这样也可完成 4 096 个对于点相加的任务.等设定个触发采集完后,将 4 096 个累加结果读入到 DSP 中,对其进行除法平均即可.

比较以上两种方案,方案 1 需要占用 DSP 大量的存储空间和时间,导致 DSP 进行的反演及数据传输变慢.此外,当时空分辨率要求更高、探测距离更大时,一次触发要采集的数据将占有更多的时间,无法留出足够时间给 DSP 进行读取数据,这就不利于系统的扩展,从而不利于其通用性.方案 2 不必频繁的请求 DSP 响应中断来读取数据,所有给 DSP 留出充足的时间来进行反演、数据传输及其他功能;另一个方面,由于方案 2 每次触发无需给 DSP 分配读取时间,所以,此种方案有利于后续功能更进一步的扩展,更具有通用性.比较以上两种方案,可以看出方案 2 更优.

系统时钟的同步下,将“读—累加—写”任务分解为多个状态,状态的切换,均在系统时钟的跳变沿进行,以保证数据的正确.在图5中,采集一次(采集4 096个数据点)的状态机用虚线圆圈标识出来;用于消除背景噪音的上千次的、对4 096个数据执行累加的状态机用点划线椭圆标识出来.累加结束,由DSP将DRAM中的数据读完后,再由DSP启动FPGA进行下一次的采集任务.

图6是按以上同步状态机,用VHDL语言设计的“读-累加-写”程序仿真时序图.

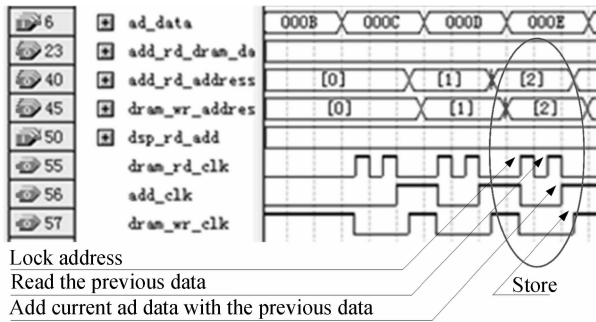


图6 仿真时序图
Fig. 6 Diagram of Simulation timing

其中,add_rd_address、dram_rd_clk分别表示执行加法时读取的DRAM地址、读取时钟信号(注意,由于FPGA提供的DRAM核其数据读出进行了两级锁存:地址锁存和数据锁存,故,读出一数据,rd_clock需要两个时钟);dram_wr_address、dram_wr_clk分别表示累加结果存放的DRAM地址、写入信号;add_clk表示加法信号.

4 系统测试

为了对数据采集系统的采集、处理效果进行验证.采取以下三个步骤对其进行测试:

首先,用精密电源给出0.1~1 V内范围(A/D的测量范围)每隔2.5 MV的恒值电压,然后由数据采集系统进行采集,并将采集到的数值换算成电压值.测量值和实际值进行比较,即可得到采集板的采样准确度.实际测量发现,在0.5 V左右,测量值和实际值有一个略大于1.2%的误差,其它点的误差均在1%之内.当然,这个准确度小于14位A/D的理论准确度,这是由于电路的设计过程的布线、电源、噪音等因素引起的.

第二步,用安捷伦信号发生器,输出两路同步信号:一路为触发信号,信号频率为1 kHz,另外一路为锯齿波信号,信号幅度为5 V.按理论分析,如果系统设计正确,采集到的数据在未转换成电压值之前应该呈一个等差数列,最大电压转换值可按如下计算.首先计算采样持续时间 $T_h = T_s \times n$.其中, T_s

为采样周期, n 为采样点数.如果采用频率为20 MHz,则 T_s 为50 ns,当采样点数为4 096的话,采样持续时间 T_h 为0.2 ms.当输入的是最大值为5 V的锯齿波信号时,当同步触发频率为1 kHz时,采集到的最大电压为: $5 V \times (0.2 ms / 1 ms) = 1 V$.实际测试发现:采集到的数据最大值的确为1 V左右,但两三个数据点之间并不呈现严格的等差数列,有时前后两个数据点的数据完全一样,有时相差3,但总体上基本呈现一个等差数列.最后分析原因,可能是信号发生器的D/A转换位数较低所致.据此分析,可以认为本采集系统的动态特性可满足要求.

第三步,验证FPAG的累计结果及DSP的处理效果.将累加次数设定几次到几千次,若设计的数据采集、预处理功能正常的,那么累加几次到几千次求平均的结果将和信号发生器发出的信号波形一致,幅值基本相同.按此要求对系统的累加求平均效果进行了测试,实际测试发现,累加次数分别是50、500及5 000次的情况,求平均得到的结果基本相同,三者之间有约2%的偏差.分析原因,有可能是信号发射器的误差引起的.

通过以上三步的测试,设计者认为,系统的静态、动态误差可以保持在2%的范围内,基本可以满足设计的要求.

以上测试完成后,将设计的数据采集系统接入到实际的激光雷达系统中进行实际验证.图7是实际使用中的、采用本文设计的数据采集系统的米散射激光雷达系统.为了对数据采集系统的采集及预处理效果进行验证,将回波信号和触发信号也同时也接入了一档高级示波器,并将示波器的累计平均次数与采集系统设置相同.图7中放大的数据是累计3 000次采集后获得的部分回波信号的波形,可以看出,波形数据和示波器基本相同,但数据采集系统的准确度较高(示波器的采集使用的是8位AD,故其分辨率较低).

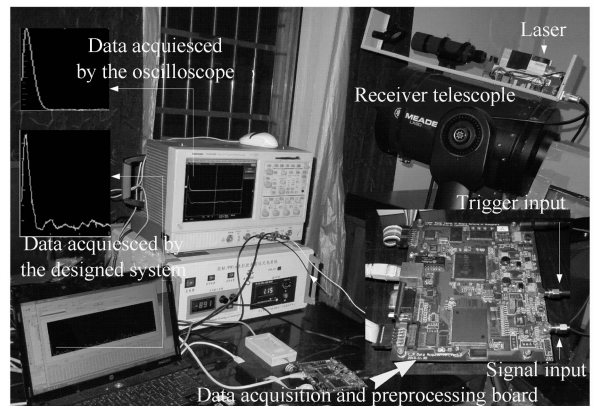


图7 米散射激光雷达系统
Fig. 7 Mie scattering laser radar

5 结论

针对激光雷达回波信号采集的特殊要求,本文设计了一款基于 FPGA 的数据采集系统,在不丢失触发脉冲的情况下,以 20 MHz 的采集频率进行多点数据采集,并进行快速的数据预处理.与现有的数据采集系统相比,本系统有通用、便携、可扩展的特点,可作为激光雷达的数据采集、处理系统推广使用.

参考文献

- [1] MAO Jie-tai, ZHANG Jun-hua, WANG Mei-hua. Summary comment on research of atmospheric aerosol in China[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2002, **60**(5): 625-634.
毛节泰,张军华,王美华. 中国大气气溶胶研究综述[J]. *气象学报*, 2002, **60**(5): 625-634.
- [2] HUA Deng-xin, SONG Xiao-quan. Advances in lidar remote sensing techniques [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, **37**: 21-27.
华灯鑫,宋小全. 先进激光雷达探测技术研究进展[J]. *红外与激光工程*, 2008, **37**: 21-27.
- [3] ADLINK Technology. PCI-9816/9826[EB/OL]. [2012-2-08]. <http://www.adlinktech.com>.
- [4] MA Zong-feng, OU Pan, ZHANG Chun-xi, et al. Research on direct lidar using photomultiplier[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, **36**: 238-241.

- 马宗峰,欧攀,张春熹,等. 光电倍增管在直接探测激光雷达中的应用研究[J]. *红外与激光工程*, 2007, **36**: 238-241.
- [5] GAO Fei. Study of laser radar for fine-detection of aerosols profiles[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2008: 16-19.
高飞. 激光雷达精细探测大气气溶胶研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2008: 16-19.
 - [6] LIU Jun, HUA Deng-xin, LI Yan. Ultraviolet lidar for profiling of the urban atmospheric aerosol in spatial and temporal at Xi'an[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(8): 1534-1537.
刘君,华灯鑫,李言. 紫外域激光雷达探测西安城区上空大气气溶胶时空剖面[J]. *光子学报*, 2007, **36**(8): 1534-1537.
 - [7] LIU Zeng-dong, LIU Jian-guo, LIU Wen-qing, et al. Compacted portable Mie lidar and its application[J]. *Optical Technique*, 2008, **34**(4): 518-524.
刘增东,刘建国,刘文清,等. 小口径便携式 Mie 散射激光雷达的研制和应用[J]. *光学技术*, 2008, **34**(4): 518-524.
 - [8] Altera international limited. cycloneII[EB/OL]. [2012-2-08]. <http://www.altera.com.cn/literature/lit-cyc2.jsp>.
 - [9] 边计年,薛宏熙. VHDL 设计电子线路[M]. 北京:清华大学出版社, 2000: 157-185.
 - [10] WANG Xu-li, ZOU Pu-yu, LIU Li. The interface design for dual-port RAM and PCI9052 based on FPGA[J]. *Electronic Technology*, 2010, **37**(1): 27-28.
王绪利,邹璞玉,刘莉. 基于 FPGA 的双口 RAM 与 PCI9052 接口设计[J]. *电子技术*, 2010, **37**(1): 27-28.

Design of a High-speed Data Acquisition System Based on FPGA for Laser Radar

XIN Wen-hui, LI Shi-chun, HUA Deng-xin, SONG Yue-hui, DI Hui-ge, ZHOU Zhi-rong
(School of Mechanical Instrumental Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: A high-speed data acquisition and preprocessing system was proposed based on FPGA for echo signal sampling of laser radar. By use of embedded DRAM and synchronous finite state-machine, the designed system, triggered by a 1 kHz excitation signal, can sample the signal at the rate of 20 MHz, and the 4 096 sampled data can be accumulated correspondingly more than 5 000 times for the purpose of filtering background noise. The completed system was applied in a Mie scattering laser radar, which can achieve the spatial and temporal resolution of 7.5 meter and the detection range of 30 km.

Key words: Laser rader; Echo signal; High-speed data acquisition; Synchronous finite state-machine; Dual-port RAM