

双通道海洋激光雷达回波光信号同步采集系统

王子贤 尚建华*

东华大学, 中国·上海 200000

摘要: 海洋在全球碳循环中具有重要作用, 其颗粒有机碳 (POC) 浓度的垂直分布信息是评估海洋碳汇能力的关键参数。基于激光雷达的主动遥感技术可实现对海洋水体 POC 剖面浓度的原位探测。为满足系统信噪比 ($\text{SNR} \geq 4.5\text{dB}$)、最大探测深度 ($\geq 80\text{m}$) 等性能要求, 本研究采用模拟探测与光子计数复合探测模式, 设计了一种具备单光子量级探测灵敏度、50dB 大动态范围及 200MHz 响应带宽的回波光信号探测系统。通过将标准单光子源射入至高速光电探测器, 测量其输出脉冲电流特性, 完成探测器驱动电路的标定; 随后将探测器输出的电流信号输入回波光信号处理电路, 同步采集模拟通道和光子计数通道的输出波形特征, 完成探测系统整体性能验证。

关键词: 单光子探测; 模拟探测; 光子计数

Dual-Channel LiDAR Echo Acquisition System for Ocean Applications

Zixian Wang Jianhua Shang*

Donghua University, Shanghai, 200000, China

Abstract: The ocean plays a crucial role in the global carbon cycle, where the vertical distribution of particulate organic carbon (POC) concentration serves as a key parameter for assessing marine carbon sequestration capacity. Active remote sensing technology based on LiDAR enables in-situ detection of POC profile concentrations in seawater. To meet system performance requirements including a signal-to-noise ratio ($\text{SNR} \geq 4.5\text{ dB}$) and maximum detection depth ($\geq 80\text{ m}$), this study developed an echo signal photo detection system employing hybrid analog and photon-counting detection modes. The system achieves single-photon-level detection sensitivity, 50 dB dynamic range, and 200 MHz response bandwidth. System calibration was performed by measuring the output pulse current characteristics of a high-speed photodetector illuminated with a standard single-photon source. The detector output current was then fed into the echo signal processing circuit for synchronous acquisition of waveform characteristics from both analog and photon-counting channels, thereby completing comprehensive performance verification of the detection system.

Keywords: single photon detection; analog detection; photon counting

0 前言

当前, 海洋遥感技术主要通过观测海表面而实现, 因而获取海洋颗粒有机碳 (Particulate organic carbon, POC) 垂直分布的海洋浮标数量及覆盖范围的能力有限, 无法实现海洋 POC 的大范围可靠探测^[1,2]。而激光雷达是目前已知的唯一有望实现海洋垂直分层机载遥感探测的技术手段^[3], 本研究采用单光子计数和模拟探测相结合的复合探测方法, 实现不同剖面深度的海洋颗粒有机碳的探测, 为海洋环境监测、海洋碳循环监测及全球气候变化提供有效的反演数据。

1 系统总体设计

双通道海洋激光雷达回波光信号同步采集系统如图 1 所示, 由灵敏度可达单光子量级的探测器电路和信号处理电路组成。其中, 探测器电路包括光电探测器及其驱动电路, 信号处理电路集成模拟探测与光子计数双通道处理功能。在探测器电路中, 驱动电路通过调节光阴极电压和反向偏置电

压实现对光电探测器增益的精确控制。在信号处理电路中, 跨阻放大电路将光电探测器的输出电流信号转化为电压信号, 该电压信号经高速放大和分路处理后, 分别输入模拟探测通道和光子计数通道。模拟探测通道主要负责对信号进行极性转换和幅度调理以满足数据采集系统的要求, 而光子计数通道则通过甄别电路实现单光子事件的精确检测与统计计数, 两个通道的协同工作确保了系统在宽动态范围内的信号采集能力。

2 电路原理及设计

2.1 高速混合光电探测器

在探测技术路线中, 由于光电倍增管是以脉冲方式工作在光子计数情况下的, 其输出信号脉冲的后沿会出现一个杂散脉冲 (后脉冲), 该后脉冲会引起主脉冲计数测量误差, 从而影响微弱光信号检测的准确性。因此, 采用高速混合光电探测器 (HPD) 进行光电信号转换, 该探测器具有优秀的后脉冲抑制能力、极好的能量分辨率和时间响应特性^[4]。

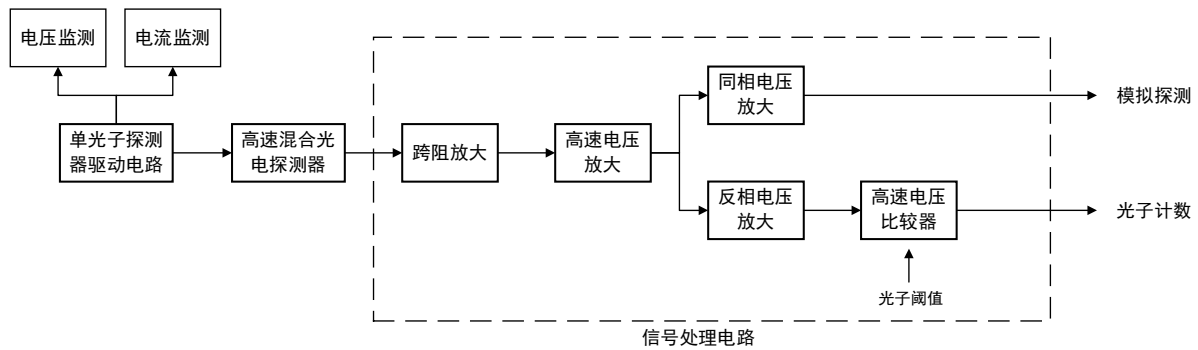


图 1 双通道海洋激光雷达回波光信号同步采集系统

2.2 探测器驱动电路设计

2.2.1 光阴极电压电路设计

HPD 的光阴极电压在 $-8000V$ 时可获得最大增益, 因此选用 C14051-15 电源模块为其提供稳定可调的负高压电源。该电源系统采用外部电压控制模式实现输出电压的调节, 通过实时监控外部电压控制信号, 可对 C14051-15 模块输出电压进行精确监测。为了进一步确保探测器工作在安全状态, 在 C14051-15 模块的电压监控管脚和电流监控管脚处分别加装数显监测模块, 从而实现对 HPD 光阴极工作电压和电流的实时监测与显示。

2.2.2 反向偏置电压电路设计

HPD 雪崩二极管的反向偏置电压工作范围为 $300\sim 500V$, 因此采用 Q05-5 转换芯片作为核心供电模块。Q05-5 模块具有 $0\sim 5V$ 的宽范围输入电压特性, 可对应输出 $0\sim 500V$ 的可调高压。考虑到探测器驱动系统采用统一的 $+15V$ 供电架构, 且探测器的反向偏置电压需根据实际工况进行精确调节以实现最佳增益匹配, 同时确保 Q05-5 模块的输出电压需要随时间、温度、负载和线路变化而非常稳定, 本设计采用高精度可调稳压器 LM317 为 Q05-5 提供基准供电电压。此外, 在反向偏置电压输出端增设了 AD 数显监测模块, 实现工作电压的实时可视化监控, 从而确保光电探测器始终处于最优工作状态。

2.3 回波信号光处理电路设计

2.3.1 跨阻放大电路

由于探测器输出的电流信号极其微弱, 因此采用跨阻

放大器 LMH34400 搭建电路。LMH34400 在 $40k$ 的跨阻增益下, 依旧能保持 $240MHz$ 的带宽, 并且具有 $50nA_{RMS}$ 的输入参考噪声, $2.4pA/\sqrt{Hz}$ 的电流噪声, $1.5ns$ 的上升/下降时间, 是目前市场上同类产品中性能较为优越的放大器件之一, 可使跨阻放大电路获得最佳的效果。

2.3.2 运算放大电路

在跨阻放大电路之后设计了基于 AD8099 运算放大器的高速电压主放电路。AD8099 作为一款超低噪声 ($0.95nV/\sqrt{Hz}$) 和超低失真 ($-92dBc@1MHz$) 的电压反馈运算放大器, 具备高线性度、低噪声输入级和极高的压摆率, 特别适合高速信号放大应用。此外, AD8099 具有独特的外部补偿功能, 允许自行设置增益带宽积, 可以灵活地使用整个动态范围而不影响带宽或产生失真。

2.3.3 电压比较计较电路

在光子计数通道中, 经过前置运放电路放大的电压信号, 需要在高速电压比较器中进行单光子甄别, 以便后续的计数统计。采用带迟滞的高速比较器芯片 TLV3601 搭建电压甄别电路, 该器件具有 $325MHz$ 的高切换频率、 $1.25ns$ 的最小脉冲宽度检测能力和 $2.5ns$ 的传播延迟, 能够快速响应输入信号并对其进行甄别, 非常适用于对速度要求较高的电路。

2.3.4 回波信号光处理电路

搭建回波信号光探测处理仿真电路, 如图 2 所示, 该仿真电路的主体包括用于模拟光电探测器输出特性的电流发生器 I_1 、跨阻放大电路、运算放大电路和高速电压比较电路。

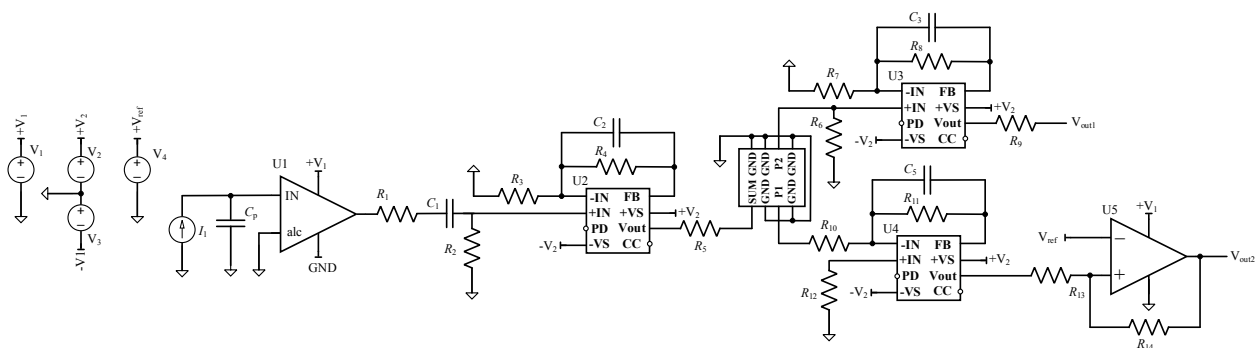


图 2 回波信号光探测处理电路原理图

3 实验标定

3.1 探测器驱动电路实验标定

3.1.1 光阴极电压电路实验

光阴极电压电路中，于击穿电压输出和地之间接入 $200M\Omega$ 的电阻，通过控制外部电压从 $0V$ 增加到 $4V$ ，记录 $V_{monitor}$ ，并计算其理论输出电压与实际输出电压进行对比，实验数据如表 1 所示。

分析表 1 数据，由于 $V_{monitor}$ 监测读数的不稳定，导致 $V_{monitor}$ 理论输出电压相较于 $V_{control}$ 理论输出电压有 $20\sim 40V$ 的误差，但整体而言 $V_{monitor}$ 理论输出和 $V_{control}$ 理论输出相符合。由于示波器量程选择原因，高压探头读数与 $V_{monitor}$ 理论输出和 $V_{control}$ 理论输出有 $0\sim 80V$ 的误差，但整体而言实际测量值与理论值相符合，并且实际输出电压与 $V_{monitor}$ 监测电压呈线性相关。因此，可以通过 $V_{control}$ 读数和 $V_{monitor}$ 读

数，综合判断 C14051-15 电源模块是否正常工作，且工作时实际输出的负高压。

3.1.2 反向偏置电压电路实验

反向偏置电压电路中采用阻值 500Ω 的滑动变阻器，通过顺时针旋转偏置电压调节器，改变滑动电阻阻值，从而改变偏置电压的输出。根据滑动变阻器阻值计算出 LM317 理论输出电压，从而对稳压器 LM317 电路和 Q05-5 模块电路性能进行测试，数据如表 2 所示。

分析表 2 数据，当滑动变阻器阻值从 0 增长到 305Ω 时，LM317 的实际输出电压与理论计算值基本一致，LM317 稳压器件工作性能良好。由于 LM317 的输出即 Q05-5 的输入，从表二三列可以看出，Q05-5 的输入输出线性度较差，并未呈线性关系。为此进行多次重复实验，记录数据与表 2 基本一致，因此可以通过记录的数据确定反向偏置电路输出的电压。

表 1 光阴极电压电路 $V_{monitor}$ 实验测试数据

$V_{control}$ (V)	$V_{control}$ 理论输出 (V)	$V_{monitor}$ (V)	$V_{monitor}$ 理论输出 (V)	高压探头读数 (V)	实际输出 (V)
0	0	0.0012	-4.8	-0.04	-40
0.1	-200	0.0431	-172.4	-0.20	-200
0.2	-400	0.0926	-370.4	-0.42	-420
0.5	-1000	0.2416	-966.4	-0.98	-980
1.0	-2000	0.4906	-1962.4	-2.04	-2040
1.5	-3000	0.7417	-2966.8	-2.98	-2980
2.0	-4000	0.9921	-3968.4	-4.04	-4040
3.0	-6000	1.4937	-5974.8	-6.08	-6080
4.0	-8000	1.9882	-7952.8	-8.08	-8080

表 2 反向偏置电压电路 $V_{monitor}$ 实验测试数据

LM317 实际输出 (V)	滑动变阻器阻值 (Ω)	LM317 理论输出 (V)	反向偏置电压输出 (V)
1.2467	0	1.2500	146
1.5696	60	1.5625	200
2.1804	179	2.1823	300
2.8023	296	2.7919	400
2.8470	305	2.8385	408

3.2 回波信号光处理电路实验

3.2.1 跨阻放大电路信号输出

本实验采用相干光强衰减法，通过将强相干光衰减到极低强度，从而近似产生单光子态。实验中，将衰减后的光入射至 HPD，并通过调节探测器驱动电路使其正常工作。HPD 的输出信号接入跨阻放大器输入端，通过示波器观测跨阻放大器的输出信号，如表 3 所示。

分析表 3 数据，可知通过调控光阴极电压，能够实现 HPD 增益的灵活调整。有助于系统在面对不同光强输入时，都能输出合适幅度的电信号，以便后续数据测量和信号处理。HPD 增益具备可调性，对系统稳定性起到至关重要的作用。

表 3 TIA 输出脉冲信号幅值随光阴极电压变化关系

光阴极电压 (V)	跨阻放大器输出脉冲幅值 (mV)
-3000	45
-4000	75
-5000	95
-6000	115
-7000	135
-8000	165

3.2.2 模拟通道和光子计数通道信号输出

图 3 所示为回波信号处理电路中模拟探测通道（黄色）与光子计数通道（蓝色）输出信号波形。模拟探测通道输出信号幅值约为 $-670mV$ ，符合数据采集卡的输入电压范围

要求；光子计数通道输出的信号为高速电压比较器的输入信号，幅值约为 -550mV，满足后续高速电压比较电路的输入要求。虽然两路信号波形存在下降沿振荡现象，但完整性良好。两路通道输出信号的上升 / 下降沿时间较跨阻放大电路输出有所增加、脉冲宽度也有所展宽，但实测信号带宽仍优于 200MHz，可以满足系统设计要求。

将高速电压比较器的参考电压设置为 400mV，能够有

效抑制下降沿振荡对电路甄别的影响。图 4 所示的蓝色波形为高速电压比较器的输出信号，通过对比高速电压比较器的输入输出波形，可以观测到输出信号延迟了约 3ns。进行多次实验并调整参考电压值，输出信号延迟稳定在 3ns。试验结果表明，该高速滞回电压比较电路能够准确甄别输入的脉冲电压信号，且其引入的时间延迟具有一致性，便于后续的光子计数。

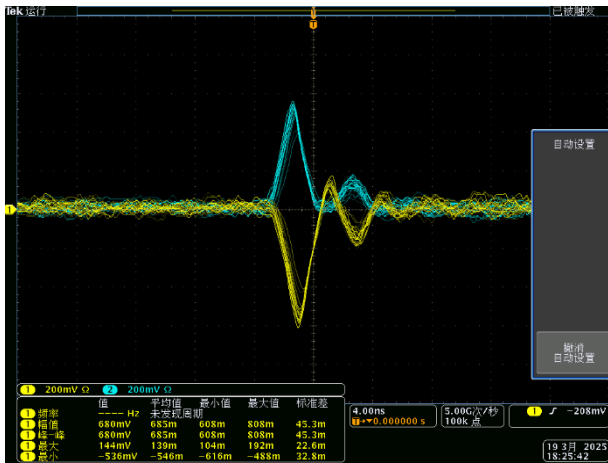


图 3 模拟通道输出信号和高速电压比较器输入信号

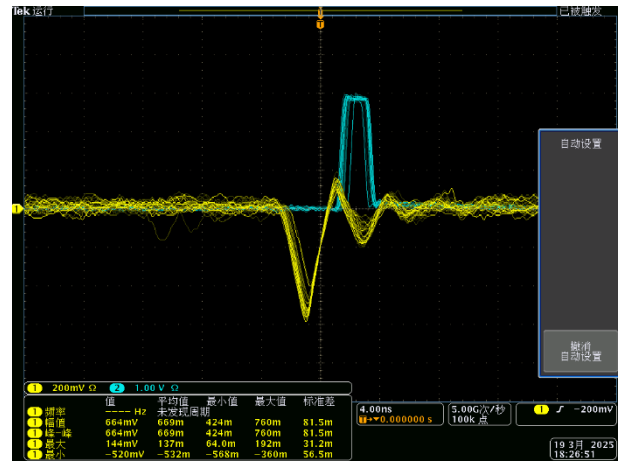


图 4 模拟通道和光子计数通道输出信号

4 实验总结

实验验证结果表明，所设计的探测器驱动电路能够稳定提供 HPD 工作所需的反向偏置电压和光阴极电压，实现 HPD 增益的精确调节。HPD 表现出优异的单光子探测能力，且光电转换后的电流信号无后脉冲干扰。回波光信号处理电路测试数据显示，模拟通道和光子计数通道输出波形均保持良好的信号完整性，满足系统设计要求。因此，在实验室环境下，双通道海洋激光雷达回波光信号同步采集系统成功实现了单光子量级探测灵敏度、50dB 大动态范围以及 200MHz 系统带宽的设计目标，为后续海洋水体颗粒有机碳 (POC) 剖面浓度信息的探测提供了可靠的技术手段。

参考文献：

- [1] 丛丕福,曲丽梅,韩庚辰,等.海洋颗粒有机碳的遥感探测与应用分析[J].海洋环境科学,2012,31(2):300-304.
- [2] 林明森,何贤强,贾永君,等.中国海洋卫星遥感技术进展[J].海洋学报,2019,41(10):99-112.
- [3] 纪鲁峰,刘秉义,朱培志,等.蓝绿光双波长船载海洋激光雷达系统设计与海上测试[J].红外与激光工程,2024,53(3):221-231.
- [4] 唐家业,徐鹏霄,戴丽英,等.混合式光电探测器[J].光电子技术,2015,35(2):73-77+90.

作者简介：王子贤，男，中国江苏扬州人，从事硬件电路设计研究。

通讯作者：尚建华。