

面向非合作目标的大动态范围激光测距系统

朱飞虎,王立,郭绍刚,吴奋陟,吴云

(北京控制工程研究所,北京 100190)

摘要:在对空间的非合作目标进行脉冲激光测距时,由于目标的距离跨度范围很大,回波信号的动态范围很大,采用单一的光学或电路调整方法都不能实现全范围的接收。针对不同的距离段,在发射端采用偏振合束器使脉冲光纤激光器和脉冲全固态激光器的光束同轴输出,并对激光的发射功率进行分档,在接收端对雪崩光电二极管的放大倍数进行分档,并引入窄脉冲峰值检测器和可变增益放大器,在自动闭环控制下使接收电路的输出稳定,实现了等效输入动态范围为 160 dB、测量范围为 15 m~20 km 的激光测距系统。

关键词:大动态范围; 增益分档; 脉冲激光测距; 峰值检测

中图分类号: TN247 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)S-0008-05

Large dynamic range laser ranging system for non-cooperative target

Zhu Feihu, Wang Li, Guo Shaogang, Wu Fenzhi, Wu Yun

(Beijing Institute of Control Engineering, Beijing 100190, China)

Abstract: When pulse laser ranging for a non-cooperative target in space, due to the large distance span of the target, the corresponding echo signal dynamic range is also great. Single method of optical or electronic adjustment can't meet the requirements of whole range receiving. According to the different distance range, in the transmitter the output beam of pulsed fiber laser and pulsed solid state laser was coaxial by polarization beam combiner and the laser emission power was classified. In the receiver the magnification of avalanche photodiode was also classified. Introducing a narrow-pulse peak detector and a variable gain amplifier, the output of the receiving circuit was stabilized by closed-loop automatic control. The equivalent input dynamic range of 160 dB and measuring range of 15 m-20 km was realized in a pulse laser ranging system.

Key words: large dynamic range; gain classification; pulse laser ranging; peak detection

收稿日期:2014-10-10; 修订日期:2014-11-15

基金项目:国家重点基础研究发展规划(2013CB733100)

作者简介:朱飞虎(1986-),男,工程师,博士,主要从事激光雷达及光学导航敏感器方面的研究。Email:zhufeihu1986@163.com

0 引言

基于脉冲飞行时间的激光测距仪作用距离远,且在信噪比足够的情况下,其测距精度基本不随距离的远近而发生变化,这两个特点使其在航空航天遥感、大地测量等领域有广泛的应用^[1]。

随着技术的发展,对激光测距仪最大测程和测量精度的要求越来越高,这就要求激光发射机具有足够高的功率,接收电路具有足够高的灵敏度和足够大的带宽。为了获得带宽和灵敏度的折中,往往在接收电路中采用跨阻前置放大器,其动态范围是有限的,例如 AD8015 跨阻放大器,其动态范围只有 35 dB。在接收系统前附加可变光阑^[2]、根据回波信号大小调整前置放大器的跨阻值^[3]等方法可以有效地扩展动态范围,但提升的幅度不够大。

文中采用在发射端对激光发射功率进行分档,在接收端对探测器增益进行分档,对后置放大器增益进行自动控制的方法,实现了 15 m~20 km 的激光测距系统,等效动态范围达到 160 dB 以上,可以满足高轨道非合作目标接近、行星软着陆等航天应用的需求。

1 激光发射系统设计

激光发射系统由脉冲光纤激光器、脉冲全固态激光器(DPSSL)、合束器以及准直器组成,两台激光器的中心工作波长均为 1 064 nm。

脉冲光纤激光器为种子光源主振荡功率放大方式(MOPA),光路为全光纤方式,如图 1 所示。其包括脉冲种子源激光器、全光纤放大器以及输出准直器

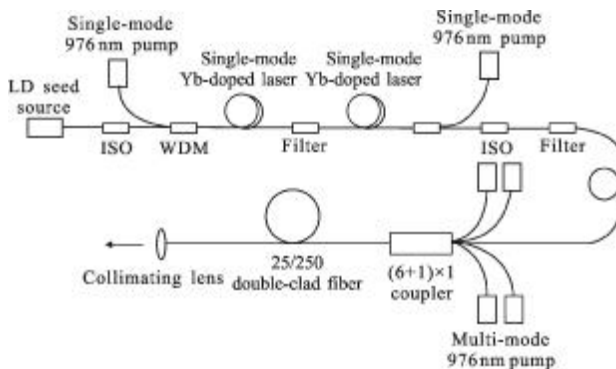


图 1 脉冲光纤激光器结构图

Fig.1 Schematic of all-fiber pulsed laser

三个部分,光纤放大器采用三级结构,第一级预放单模光纤输出最低档峰值功率 20 W,第二级预放单模光纤输出第二档峰值功率 500 W,主放级双包层光纤输出最高档峰值功率 12.5 kW,各级间加入滤波器与隔离器保持激光的稳定传输。脉冲光纤激光器的重复频率为 50 kHz,脉冲宽度约为 10 ns。

脉冲全固态激光器为电光调 Q 的 Nd:YAG 激光器,调 Q 介质为 Li:NbO₃ 晶体。在脉宽为 150~200 μs、最大功率为 100 W 的准连续激光二极管阵列泵浦下,输出能量为 50 mJ(峰值功率 4 MW)、重复频率为 5 Hz、脉冲宽度为 15 ns 的脉冲激光。通过减小泵浦光电流,得到脉冲全固态激光器的第二档输出能量 5 mJ(峰值功率 400 kW)。脉冲全固态激光器谐振腔内设置有起偏器,其输出的脉冲激光为线偏振光。

为了实现中心波长相同的两束激光同轴输出,光纤激光器中的预防级和主放级光纤均采用了保偏光纤。脉冲 LD 种子源激光器发出线偏振激光,经过三级保偏光纤后依然为线偏振光。通过机械安装保证光纤激光的偏振方向与全固态激光的偏振方向互相垂直,这样两束激光将可由偏振合束器合为一束,然后再由准直扩束器统一压缩两束激光的发散角,如图 2 所示。

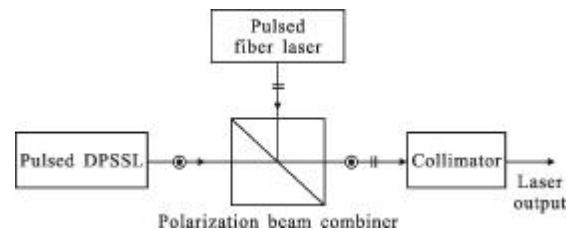


图 2 激光发射系统合束示意图

Fig.2 Schematic of laser beam combining

2 探测器的增益控制

为了获得较高的测量灵敏度,脉冲飞行时间激光测距仪一般采用雪崩光电二极管(APD)作为探测器,其放大倍数通常设置在 100 倍左右。该系统采用带制冷的雪崩光电二极管 C30955EH-TC,其工作时壳温稳定在 0℃,当反向偏置电压为 350 V 时,在 1 064 nm 处的响应度为 34 A/W。

通过激光器的功率分档来压缩动态范围是不够的,为此,该系统通过调整 APD 的反向偏置电压来改变 APD 的放大倍数,APD 的放大倍数 M 与反向

偏置电压 V 的关系为^[4]:

$$M = \frac{1}{1 - (V/V_{br})^r} \quad (1)$$

式中: V_{br} 为击穿电压; r 为与 APD 材料相关的参数。从上式可以看出, 反向偏置电压越小, APD 的放大倍数越小。

APD 的反向偏置高压产生电路采用反激式开关电源结构, 其核心是 DC-DC 转换芯片 LT3580, 该芯片内部集成有开关管以及误差放大器。高压产生电路原理如图 3 所示。

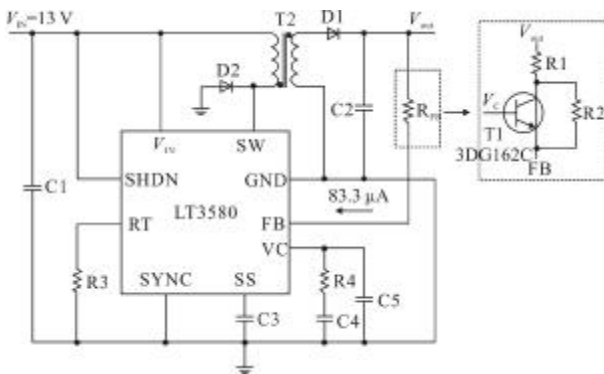


图 3 反向偏置高压产生电路原理示意图

Fig.3 Schematic of reverse bias voltage generating circuit

通过改变反馈电阻可以实现输出高压的变化, 两者的关系为:

$$V_{out} = R_{FB} \cdot 83.3 \mu A + 1.215 \quad (2)$$

反馈电阻的变化是通过高压三极管 T1 的导断来实现的。图 3 中, R_1 为 $3.22 M\Omega$, R_2 为 $1 M\Omega$, 当三极管 T1 的基极电压 V_c 小于 $1 V$ 时, 三极管关断, 反馈电阻为 R_1 与 R_2 的串联, 总电阻为 $4.22 M\Omega$, 此时对应的输出高压为 $353 V$, APD 的放大倍数为 100 倍。当三极管的基极电压 V_c 大于 $2 V$ 时, 三极管导通, 反馈电阻为 $3.22 M\Omega$, 此时对应的输出高压为 $270 V$, APD 的放大倍数为 10 倍。

三极管的选用需考虑到击穿电压和反向漏电流两项指标, 在其断开时三极管发射极与集电极之间的电压(即 R_2 的分压)为 $90 V$, 所以击穿电压应大于 $90 V$; 另一方面, 因为反馈端的输入电流为 $85.3 \mu A$, 所以三极管关断时的反向漏电流应远远小于该值, 以免分流使电阻 R_2 两端的电压变小, 从而使反向偏置高压达不到预定值。

该系统选用高压三极管 3DG162C, 其 $V_{(BR)CBO}$ 和 $V_{(BR)CEO}$ 均大于 $140 V$, 在图 3 的应用中不会击穿, 其

I_{CBO} , I_{CEO} 和 I_{EBO} 均小于等于 $0.1 \mu A$, 也不会对电阻分压造成影响。

3 系统增益分档策略

该系统的工作距离范围为 $15 m \sim 20 km$, 根据不同的工作距离确定激光器的发射功率档和 APD 探测器的增益档, 分档策略如表 1 所示。

表 1 系统的增益分档策略

Tab.1 Strategies of gain classification in this system

Working distance range	Laser type	laser peak power	APD detector responsibility / $A \cdot W^{-1}$
15-50 m	Fiber laser	20 W	3.4
50-110 m			34
110-240 m			3.4
240-500 m			34
500-1 200 m			3.4
1 200-2 000 m	DPSSL	12.5 kW	34
2-5.5 km			3.4
5.5-7 km			34
7-11 km			3.4
11-20 km			34

在表 1 所述的分档策略下, 根据点目标和面目标的激光雷达方程可以计算得到不同距离 APD 探测器输出的光电流, 如图 4 所示。

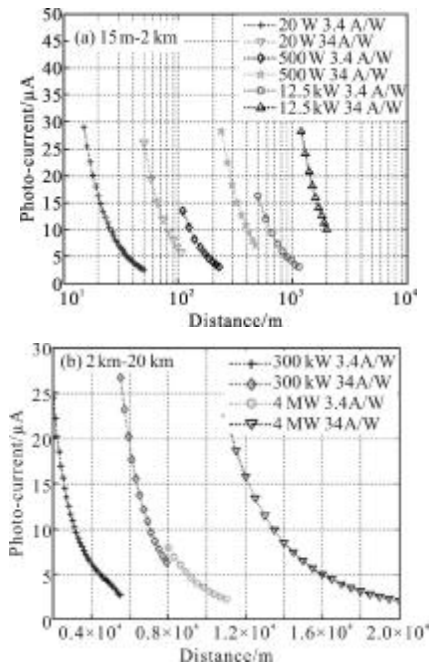


图 4 APD 探测器输出光电流随距离的变化曲线

Fig.4 Output photo-current of APD detector versus distance

从图4中可以看出,APD输出光电流的变化范围为 $2.04\sim 28.9\mu\text{A}$,位于前置跨阻放大器AD8015的线性放大输入电流范围之内。通过以上的增益分档策略,光电流的动态范围被压缩至23dB。

4 后置放大器的增益控制

在脉冲飞行时间激光测距系统中,时刻鉴别精度是影响测距准确度的一个关键因素。输入电压幅度变化会引起时刻鉴别电路的漂移误差,幅度变化越大,漂移误差越大,测距的准确度越低^[5-6]。

为了减小系统的测距漂移误差,该系统在后置放大电路中采用自动增益控制的方法使输出电压幅度基本保持不变。自动增益控制电路由可变增益放大器(VGA)、窄脉冲峰值检测电路、A/D转换器、D/A转换器以及FPGA组成。峰值检测电路采样回波信号脉冲的峰值,并将其保持住,由A/D转换器转换为数字量,FPGA根据采集的峰值信号幅度以及当前的增益电压来判断需要切换增益电压的档位,然后通过D/A将转换的模拟量送给可变增益放大器的增益控制端,从而实现后置放大器增益的自动闭环控制,如图5所示。

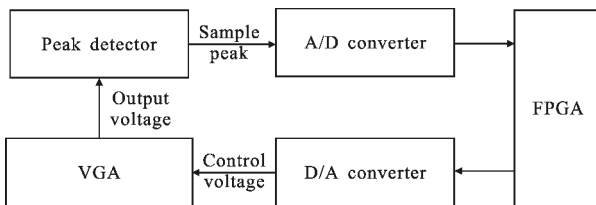


图5 自动增益控制原理框图

Fig.5 Schematic of automatic gain control

由于发射激光脉冲的宽度小于10ns,峰值检测电路的带宽需大于100MHz。该系统采用基于跨导放大器的峰值采样芯片OPA615,其由高速采样比较器和跨导缓冲器组成,带宽达到700MHz。电路原理如图6所示。二极管D1的选型很关键,为了实现对保持电容C1的快速充电,其开关时间需很短,另一方面,当输入端没有回波脉冲信号时,二极管D1的反向漏电流将导致保持电容C1上的电荷泄露到CHLOD端,所以反向漏电流也需很小,肖特基二极管的反向漏电流较大,不是理想的选择^[7]。该系统选用快速开关二极管1N914,其反向恢复时间小于4ns,

反向漏电流小于25nA,可以将峰值电压有效的保持住。

另外,由于OPA615输出级跨导缓冲器的静态电压不为零,射极的静态偏置电压为1.5V,为了使小幅度的输入脉冲信号能够被检测到,在正输入端(In+)附加了直流偏置。为防止直流偏置与交流脉冲信号之间发生相互影响,交流脉冲通过电容C2串联输入,直流偏置通过电感L1串联输入。

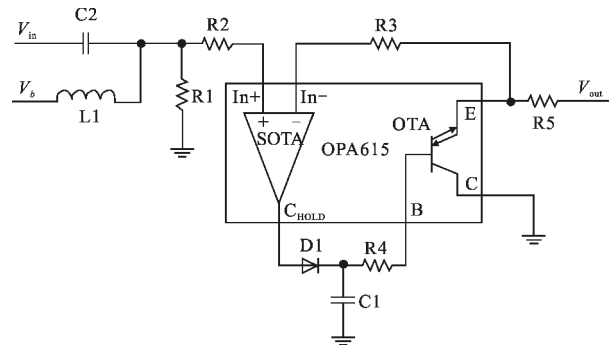


图6 峰值采样电路原理图

Fig.6 Schematic of peak detector

5 结论

文中由同轴输出的脉冲光纤激光器和脉冲全固态激光形成激光发射单元,通过在发射端对激光峰值功率进行分档,在接收端对APD的放大倍数进行分档,实现了从等效输入动态范围160dB到23dB输出动态范围的压缩,从而使接收系统的前置放大器处于线性放大区。进一步通过后置放大器的自动增益控制获得了固定值的电压幅度输出,实现了精度(1σ)优于5cm、测量范围为15m~20km的大动态范围激光测距系统。

参考文献:

- [1] Li Ran, Wang Cheng, Su Guozhong, et al. Development and applications of space-borne LIDAR[J]. Science & Technology Review, 2007, 25(14): 58-63. (in Chinese)
李然, 王成, 苏国中, 等. 星载激光雷达的发展与应用[J]. 科技导报, 2007, 25(14): 58-63.
- [2] Zhang Bingna, Huang Genghua, Shu Rong, et al. Automatic adjustment technology of diaphragm used for large dynamic laser ranging with centimeter grade precision [J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(7): 1788-1792. (in Chinese)
张冰娜, 黄庚华, 舒嵘, 等. 用于大动态范围厘米精度激光测距的孔径光阑自动调整技术[J]. 红外与激光工程, 2013,

- 42(7): 1788-1792.
- [3] Zhu F H, Gong K, Huo Y, et al. A wide dynamic range laser rangefinder with cm-level resolution based on AGC amplifier structure[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2012, 55(2/3): 210-215.
- [4] Guo Ying, Chen Yi, Huang Genghua, et al. Method of automatic gain control used in high precision pulse laser rangefinder[J]. *Laser & Infrared*, 2010, 40(4): 345-348. (in Chinese)
郭颖, 陈弈, 黄庚华, 等. 一种应用于高精度脉冲激光测距的自动增益控制方法[J]. *激光与红外*, 2010, 40(4): 345-348.
- [5] Kilpela, Ylitalo A, Maatta J, et al. Timing discriminator for pulsed time-of-flight laser rangefinding measurements[J]. *Rev Sci Instrum*, 1998, 69: 1978-1984.
- [6] Zhao Dalong, Chen Qiansong, Qin Laigui, et al. Study on walk error in pulsed laser range-finding[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2004, 31(9): 1112-1116. (in Chinese)
赵大龙, 陈千颂, 秦来贵, 等. 脉冲激光测距漂移误差的研究[J]. *中国激光*, 2004, 31(9): 1112-1116.
- [7] Hu Xianlong, Weng Dongshan, Feng Qi, et al. A peak hold circuit for narrow pulse [J]. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 2009, 29(1): 42-45. (in Chinese)
胡贤龙, 翁东山, 冯旗, 等. 窄脉冲信号峰值保持器[J]. *核电子学与探测技术*, 2009, 29(1): 42-45.