

# 机载扫描激光雷达的研制

王建宇 洪光烈 卜弘毅 徐卫明 肖功海 何志平 林均仰 舒 嵘

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

**摘要** 研制了一台机载三维激光雷达系统,它采用 Nd:YAG 高重复频率激光器作为光源,检流计和摆镜构成扫描机构,C30659-1060-R8B 雪崩激光二极管作为望远镜回波探测,Si 的 PIN 管作为发射光触发脉冲的探测,时间间隔测量卡用来探测距离。探测的距离精度 35 cm,振镜摆动频率:50 Hz(光学角 $\pm 10^\circ$ ),20 Hz(光学角 $\pm 25^\circ$ );振镜摆动角度:机械摆角 $\pm 12.5^\circ$ (实现光学摆角 $\pm 25^\circ$ );回波强度 8 bit;高重复频率累加可以得到三维的距离和强度信息。

**关键词** 光学制造;激光雷达;成像;检流计扫描镜;时间间隔测量电路

**中图分类号** TN958.98 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092909.2584

## Study on Airborne Scanning Ladar

Wang Jianyu Hong Guanglie Bu Hongyi Xu Weimin Xiao Gonghai  
He Zhiping Lin Junyang Shu Rong

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

**Abstract** The compact 3-D imaging ladar system was established, which uses high PRF laser pulses and a C30659-1060-R8B avalanche photo-diode (APD) detectors with independent digital time-of-flight counting circuits. The scanner uses galvanometer-oscillating mirror. Range resolution is 35 cm and scanner angle is  $0 \sim \pm 25^\circ$ . Scan frequency is: 20 Hz for  $\pm 25^\circ$ , 50 Hz for  $\pm 10^\circ$ . With appropriate optics, the digital time value represents a 3-D spatial image frame of the scene. Successive image frames illuminated with the multi-kilohertz pulse repetition-rate laser are accumulated into range histograms to provide 3-D volume and intensity information.

**Key words** optical fabrication; ladar; imaging; galvanometer-scanning mirror; time-of-flight counting circuits

## 1 引言

机载激光三维成像是 20 世纪末迅速发展起来的快速获取地面三维信息的新技术。这一技术已被应用于大型项目工程进展监测;地面工作困难的滩涂、荒漠、无人区、岛礁的资源环境专题制图;经济发达区资源环境动态监测;地形勘察、道路规划、林业调查、高压线巡检、管线检测和灾害评估以及城市建筑物三维地形等方面。近些年来,特别是过去 3 年来在国际主流杂志上发表各类研究论文越来越多<sup>[1~3]</sup>。国际上激光三维成像这样的系统有 Optech 公司的 ALTM3100,Leica 公司的 ALS50。

为了满足国内机载遥感的需求,我们研制了机

载扫描激光雷达系统。采用激光单点扫描进行地面点空间采样,即使用高重复频率的激光发射,通过检流计振镜扫描机构快速扫描,不仅可以进行时间间隔测量距离,还通过对激光回波峰值强度进行量化得到地表物体对特定激光波长的反射强度信息,实现成像的目的。

## 2 总体设计

激光发射光斑扩束后经过 3 次反射后到达地面目标,地物反射光斑经过振镜反射后进入接收望远镜系统。接收望远镜采用反射式系统,接收有效口径不小于 50 mm。采用扫描振镜系统实现光束扫

收稿日期: 2008-10-31; 收到修改稿日期: 2009-01-08

基金项目: 国家 973 计划(2009CB724004)资助课题。

作者简介: 王建宇(1959—),研究员,主要从事红外遥感和激光遥感装置等方面的研究。

E-mail: jywang@mail. sitp. ac. cn

描。检流计式电机驱动振镜摆动。为解决光电扫描舱的激光收发一致性问题,在结构上安排了与摆角电机共轴的位置传感器输出角位置信号。激光发散角为 0.3 mrad 和 0.8 mrad,对应系统有两种工作模式:小发散角飞行高度较高(1000 m 以上,常用模式)和大发散角飞行高度较低(800 m 以下人眼安全模式),光电扫描舱系统在机械设计上主要考虑:采取将光电扫描舱安装在 PAV30 稳定平台上,实现隔振和减少系统的不稳定度。对地扫描时,脉冲激光束经扩束镜和转折镜射向振镜的中心,随扫描镜的旋转进行不同角度的对地扫描测距,转折镜处透出的少量激光为 PIN 管接收,用于主波采样,作为时间-距离变换电路(测距电路)的开启脉冲和其他控制系统的触发脉冲;地面的激光回波脉冲由望远镜会聚至聚焦面处的雪崩二极管,雪崩二极管的输出脉冲转换为时间-距离变换电路的停止脉冲和被峰值采样作为强度。位置传感器与扫描镜共轴安装,位置传感器输出扫描角度。

机载激光雷达系统主要分为以下几个模块:激光发射光路、激光接收光路、激光扫描模块、探测器及其电路模块、时间间隔测量、扫描角度和回波强度采样模块。

机载激光雷达系统的地面激光脚印分布如图 1

所示,扫描器工作两点要求:a)扫描行间距 $\approx$ 脚印点间距 $\times 2$ ,这是希望点密度均匀;b) $(2 \times \text{最大扫描角}) \times \text{扫描频率} \leq 1000$ ,这是限制扫描角度和扫描频率,为了保证扫描电机转动角度与驱动电流成正比(扫描角度和扫描频率过大,会导致转动角度与驱动电流非线性关系)。

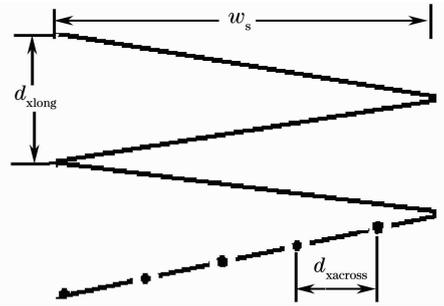


图 1 激光脚印点分布

Fig. 1 Laser footprint distribution

图 1 所示的扫描刈宽  $w_s = 2h \tan \alpha$ , 其中  $h$  为飞行高度,  $\alpha$  振镜光学摆角;那么每个扫描行的脚印点数目  $n = f_{\text{laser}} / (2f_{\text{scan}})$ , 其中  $f_{\text{laser}}$  为激光器的重复频率,  $f_{\text{scan}}$  为摆镜的扫描频率;扫描线上脚印点间距  $d_{\text{xacross}} = w_s / n = 4h \tan \alpha f_{\text{scan}} / f_{\text{laser}}$ ;而扫描行间距  $d_{\text{xlong}} = v_{\text{plane}} / f_{\text{scan}}$ , 其中  $v_{\text{plane}}$  为飞行速度;此外为了避免相邻的两个光脉冲产生混叠,激光单脉冲传输时间  $(2h/c) > (1/f_{\text{laser}})$ 。表 1 给出了一些参数实例。

表 1 激光扫描和脚印点参数表

Table 1 parameter for laser scanning and footprint distribution

Flight altitude	Scanner angle	Swath width	Laser repetition rate	Scan frequency	Beam Divergence	Beam diameter	Row Footprint amount	Forward spot spacing	Flight speed $V_{\text{plane}}$	Row Spacing
$h/\text{km}$	$\alpha/(\text{°})$	$w_s/\text{km}$	rate $f_{\text{laser}}/\text{kHz}$	$f_{\text{scan}}/\text{Hz}$	$/\text{mrad}$	$/\text{m}$	amount	spacing $/\text{m}$	$/(\text{km}/\text{h})$	$/\text{m}$
3.0	25	2.8	33	20	0.3	0.9	825	3.39	300	4.17
2.5	25	2.33	50	20	0.3	0.75	1250	1.82	250	3.47
1.7	20	1.24	70	25	0.3	0.51	1400	0.884	200	2.22
1.1	12.5	0.488	100	40	0.3	0.33	750	0.650	200	1.38

距离精度的计算:  $\Delta R = \frac{c\tau}{2\sqrt{R_{\text{SN}}}}$ ,  $c$  光速,  $R_{\text{SN}}$  为

信噪比取 20;光脉冲宽度  $\tau$  取 10 ns;  $\Delta R$  约为 33 cm;水平定位精度:光束的指向角度变化小于 0.5 mrad,引起的水平方向的距离不确定性,即水平定位精度为  $1/2000 \times h$ 。

### 3 光路系统设计

采取激光发射系统与回波接收系统光轴共轴的方式,激光发射方向与望远镜视轴被调成共轴,望远镜的瞬时视场大于激光束的发散角,由此来保证激光投射在被测目标上的光斑将始终落在望远镜的接

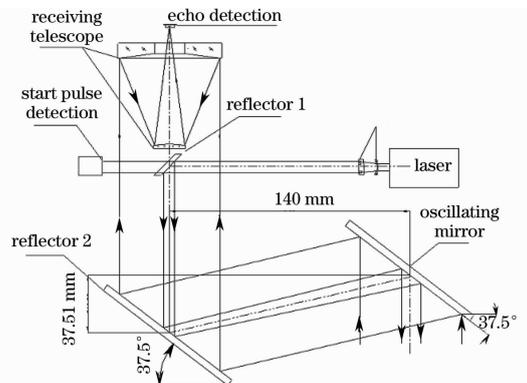


图 2 激光发射和接收光路示意图

Fig. 2 Optics of laser transmitting and receiving

收范围中心附近。激光由激光器出射后,由可变扩束镜对其进行扩束,满足可调激光发散角  $0.3/0.8$  mrad 的要求,扩束后的激光由振镜反射投射到被测目标上,由被测目标反射的激光回波再由振镜反射并通过窄带滤光片滤波进入接收望远镜。如图 2 所示。

### 3.1 激光器与激光发射光路

选用美国 Spectra-Physics 公司产品 BL6S-106Q,激光波长  $1064$  nm;高斯光束 TEM<sub>00</sub>,  $M^2 < 1.2$ ;使用脉冲频率为  $30 \sim 100$  kHz;使用脉冲宽度  $4 \sim 10$  ns;脉冲能量  $> 150$   $\mu$ J ( $35$  kHz);平均功率 (脉冲能量  $\times$  重复频率) 大于  $5$  W;脉冲-脉冲之间能量不稳定性  $< 2\%$ ;激光发散角  $< 3$  mrad;光束的指向角变化  $< 0.5$  mrad;光束直径  $0.5$  mm。

激光扩束镜由一负镜、一正镜组成,激光扩束镜设计扩束倍数  $3.75 \times, 10 \times$ ;这样激光在镜筒内没有会聚点,对防止激光损伤有利。系统结构简洁,无中心挡光,不损失发射的激光能量,扩束镜表面镀增透膜,减小能量损失。发射光学总效率  $> 95\%$ 。

### 3.2 接收光路

接收望远镜设计瞬时视场  $5.0$  mrad;有效口径  $\leq 50$  mm ( $\Phi 60 \sim \Phi 28$  主镜  $60$  mm,副镜及其机构挡光面  $28$  mm);滤光片透过率半峰值带宽  $1$  nm (峰值透过率  $50\%$ )。

总的光效率在激光器功率不能任意要求的情况下,接收的能量是关键的问题。因为弥散意味着能量的损失,所以对接收望远镜的弥散斑大小有较高的要求。考虑结构长度不宜过长,设计时采用的望远镜系统是卡塞格林接收系统;接收光路光学总效率大于  $44\%$ 。

扫描摆镜采用石英玻璃加镀银膜,金属膜的反射率随角度变化小(介质反射膜反射率随角度变化所以不被采用),石英相对于 K9 玻璃密度小有利于限制转动惯量;折转镜(角度固定)镀介质膜(对  $1064$  nm 全反)。为了减小摆镜的面积(进一步控制摆镜转动惯量),其垂直反射时(即扫描角位  $0$ )摆镜与水平方向的斜角不是常用的  $45^\circ$ <sup>[4,5]</sup>,而是  $37.5^\circ$ 。

转折镜和扫描镜中心之间距离大于  $\frac{\sin(50^\circ + 52.5^\circ)}{\sin 50^\circ} \frac{l_1}{2} + \frac{\sin(50^\circ + 65^\circ)}{\sin 50^\circ} \frac{l_2}{2}$ ,  $l_1$  表示转折镜长度,  $l_2$  表示扫描镜长度。 $l_1$  大于  $60/\sin 52.5^\circ$ ,  $l_2$  大于  $60/\sin 40^\circ$ ,单位 mm,目的在于防止光束扫描到边上被挡。

## 4 激光扫描模块设计

### 4.1 电机及其驱动的选型

由于振镜需要做高速振动,一般的电机无法满足这样高速起停的要求。根据调研,在这样往复运动的场合通常使用检流计式摆动电机。根据所需光斑直径,目前可以选用的摆动电机有美国 CTI 公司的 6900。

电机最大旋转角度  $40^\circ$ ;峰值电流  $10$  A;小角度响应时间  $6$  ms;为适应我们的摆角和频率要求,严格限制负载惯量,这一点很重要,推荐最大负载  $1000$  g/cm<sup>2</sup>,实际转动惯量  $721$  g $\cdot$ cm<sup>2</sup>。

驱动考虑 CTI 提供的驱动电路 MicroMax 671XX,一方面给电机提供驱动电流,另一方面具有两级闭环控制系统与位置传感器一道实现转角控制。

### 4.2 电机的工作模式

采用 Z 字形扫描,飞机飞行高度为  $h$ ,扫描视场角(最大)为  $\pm \alpha$ ,扫描频率为  $f_{\text{scan}}$ ,激光发射频率为  $f_{\text{laser}}$ 。为保证成像效果,地面激光点应均匀分布。激光点在地面的移动速度为常数,设为  $v = 4f_{\text{scan}} \cdot h \tan \alpha$ ,对  $1/4$  周期内任意扫描角度有:  $h \tan \theta(t) = vt$ 。如图 3 所示考虑到电机运动角度  $\varphi(t) = 1/2 \cdot \theta(t)$ ,假定电机转角跟驱动电流成正比,可得

$$\varphi(t) = kI(t),$$

$$I(t) = \frac{1}{2k} \arctan(vt/h) = \frac{1}{2k} \arctan(4f_{\text{scan}} \tan \alpha \cdot t),$$

$$\varphi(t) = \frac{1}{2} \arctan(vt/h) = \frac{1}{2} \arctan(4f_{\text{scan}} \tan \alpha \cdot t),$$

$$t \in [0, T_{\text{scan}}/4]$$

$$I(t) = \frac{1}{2k} \arctan(vt/h) = \frac{1}{2k} \arctan(4f_{\text{scan}} \tan \alpha \cdot t),$$

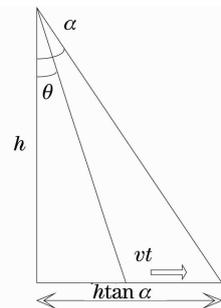


图 3 扫描示意图

Fig. 3 Galvanometer angle curve

可见驱动电流随时间不是严格线性变化的。

由扫描的对称性,可以将以上结论( $1/4$  周期)推广到全周期内,取扫描频率  $f_{\text{scan}} = 20$  Hz,  $\alpha = 30^\circ$ ,画出电机运行的角度和速度相对于时间的关系曲

线,如图 4 所示,横坐标为时间。

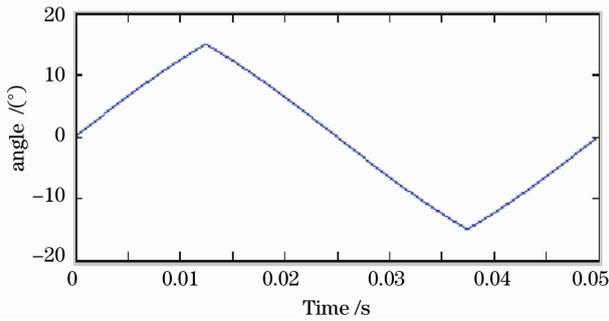


图 4 电机角度曲线

Fig. 4 Illustration of scanning

扫描电机的驱动电流是和转角接近成比例关系的,可以根据角度曲线控制电机运动。这是有前提的,就是(1)摆镜的惯量不能过量,(2)摆角不能过大,(3)摆动的频率不能高;即摆角 $\times$ 摆动频率 $<1000$ 。

### 4.3 扫描镜的设计

振镜倾斜安装,当摆动角度为 0 时,镜面与入射激光束成  $\varphi(52.5^\circ)$ ,光束垂直入射到地面;振镜最大摆动角度  $+12.5^\circ$ (光线扫描角  $2\times 12.5^\circ$ ),在最大摆动角度处,入射激光光线和振镜面构成的角度为  $40^\circ(52.5^\circ - 12.5^\circ)$ ,由于接收口径取 60 mm,镜面长度在 100 mm 以内。镜面椭圆形,镜面长轴应大于(mm):  $60/\sin(\varphi - 12.5^\circ)$ ,显然镜面最小短轴应

不小于 60 mm;镜面材料选用石英玻璃,其转动惯量不大于  $750 \text{ g}\cdot\text{cm}^2$ 。

### 4.4 同轴位置传感器的性能指标

直接采用与电机一体化的位置传感器,输出重复精度  $1.5 \mu\text{rad}$ 。扫描角度分辨率  $10 \mu\text{rad}$ ,位置传感器输出重复精度  $1.5 \mu\text{rad}$ ,线性度 99.9%。它可以与电机驱动形成闭环角度控制。AD16 位分辨率 ( $8 \mu\text{rad}$ ) 即可以。

## 5 探测单元电路设计

### 5.1 主波 PIN 管探测

假定介质反射镜透过率  $0.5\% \sim 0.1\%$ ,经过扩束镜后光束直径 5 mm,光电二极管光敏面直径 0.3 mm,激光束  $50 \mu\text{J}$ (最小),响应度  $0.9 \text{ A/W}$ ,输出电流  $(50 \times 10^{-6} \text{ J}) / (10 \times 10^{-9} \text{ s}) \times 0.1\% \times (0.3 \text{ mm} / 5 \text{ mm})^2 \times (0.9 \text{ A/W}) = 0.162 \text{ A}$ (最小),说明主波信号很强。

采用 InGaAs 光电二极管,光敏面直径  $300 \mu\text{m}$ (小于),采样带宽大于 200 MHz(上升时间 1.5 ns)。可以满足激光主波 PIN 管取样信号小于 10 ns 的要求。图 5 表示主波探测原理框图。

当一次飞行高度不变、脉冲重复频率不变,激光器的脉冲能量变化小于 2%,所以这次设计主波探测不监视其能量变化,即不做峰值采样。

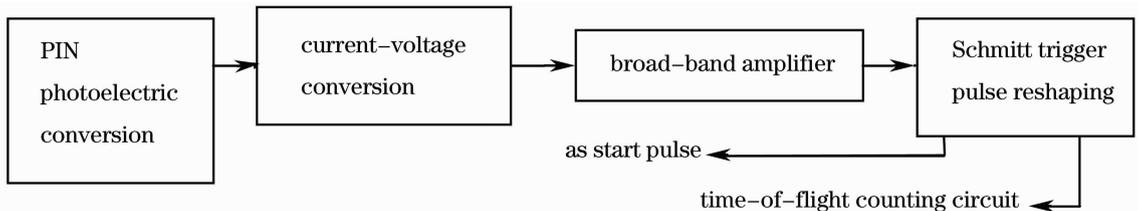


图 5 主波探测

Fig. 5 Start pulse detection

### 5.2 回波接收电子学系统

采用 C30659-1060-R8B 雪崩光电二极管,光敏面直径 0.8 mm,工作偏压 180~250 V,上升时间 2 ns,带宽 200 MHz。它的优点是内部含有前置放大器(电流转换电压),噪声较小,效率较高;雪崩二极管信号经放大处理后,通过同轴电缆提供给数据采集系统进行进一步处理<sup>[6]</sup>。

### 5.3 接收灵敏度计算

进入激光探测器的回波信号功率由雷达方程<sup>[3]</sup>给出(在考虑漫散射大目标的情况下)

$$P_r = P_t T_1 T_2^2 \sigma A_r \cos \theta / (\pi R^2),$$

上式中  $P_t$  为激光发射功率,  $A_r$  为有效接收口径面积,  $R$  为目标的距离,  $T_1$  为接收发射系统光学总透过率,  $T_2^2$  为双程大气传输透过率,为目标反射率,  $\theta$

为激光束与目标之间的夹角。

假设机载平台最大高度 3.0 km,激光能量  $150 \mu\text{J}$ ,激光脉宽 7 ns,光学系统效率 40% (发射  $95\% \times$  接收  $44\%$ ),大气双程透过率 0.6,地面对 1064 nm 波长反射率一般大于 0.1。

当激光垂直水平面方向入射时,处于最大高度 3.0 km 回波接收系统接收到的激光能量大于  $3.57 \times 10^{-8} \text{ W}$ ;当激光入射角为  $30^\circ$  时,回波接收系统接收到的激光能量大于  $3.09 \times 10^{-8} \text{ W}$ (对应回波最小的运行情况)。

为了保证可靠探测,需要进入探测器的回波信号功率大于激光测距系统最小可探测输入功率<sup>[7]</sup>  $P_{\min}$ ,即  $P_r > P_{\min}$ 。

$$P_{\min} = R_{\text{SNmin}} N_v(f) B_n^{1/2} / R_v$$

对于 C30954E/APD 雪崩光电二极管而言,电压响应度  $R_v$  大概 200 kV/W,噪声等效电压密度  $N_v(f)$  大概为 20 nV/Hz<sup>1/2</sup>,放大器带宽  $B_n$  设定为 200 MHz,信噪比最小要求  $R_{SNmin}$  为 20,计算得到最小可探测输入功率  $P_{min}$  大约  $2.828 \times 10^{-8}$  W,满足  $P_r > P_{min}$  条件。

太阳地表反射功率  $p_b = A\Omega S_b(\lambda)\Delta\lambda\sigma T\cos\varphi = A\pi\theta^2/4S_b(\lambda)\Delta\lambda\sigma T\cos\varphi$ ,  $\sigma$  为地表散射系数,  $\Omega, \theta$  为接收光栏的孔径立体角和平面角(视场角),  $\eta$  为接收的光效率,  $S_b(\lambda)$  谱辐射率 [W/(m<sup>2</sup>·nm·sr<sup>1</sup>)].  $\theta$  取 5 mrad,  $\Delta\lambda$  取 1 nm,  $A$  取  $(0.05/2)^2 \times 3.14$ ,  $S_b(\lambda)$  取 0.08 W/(m<sup>2</sup>·nm·sr),  $\sigma$  取 0.5, 透过率取 0.44,  $p_b$  不大于  $2.2 \times 10^{-10}$ , 可见地表对太阳光的发射经过滤光片以后其能量远小于回波,所以它对信噪比影响不是很大。

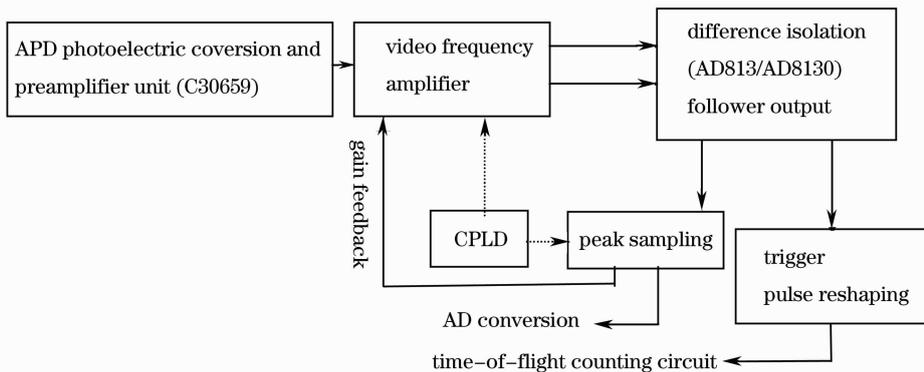


图 6 回波探测

Fig. 6 Echo detection

放大器输入动态范围大约 6~225 mV;这是一种双端输入、双端输出的差分放大器,有利于抑制共模噪声,后接 AD8131(双端输入、双端输出)过渡一下,再由 AD8130 射极跟随<sup>[8]</sup>。图 6 表示了回波探测的原理框图。

## 6 系统控制与信号处理

主波电路采用 PIN 管接收部分激光(脉冲),通过电流转换电压,再由单稳态触发器将主波信号整形为数字脉冲信号,分别供给时间间隔测量卡、回波放大器、数据采集卡集线插板,作为一个测量周期的起始信号。

回波接收电路,采用 APD 接收回波光信号,并将其转换为电脉冲,由一个可变增益程控放大器进行放大,并通过单稳态触发器整形为数字脉冲。接收电路将放大后的回波信号进行峰值采样,并通过 8 bit ADC 进行量化,送入一个 CPLD 加以判别,并控制放大器的放大倍数。如此,可以形成一个闭环控制。量化后的回波峰值还可以送入 NI 数据采集卡进行传输和存储。同时还预留了从数据采集卡到

带宽的考虑:把激光器输出的脉冲随时间变化看作是高斯脉冲,其傅里叶变换也是高斯波形;高斯时间脉冲宽度  $\sigma$ ,其频谱宽度  $\Delta f = 2/\sigma$ ,探测器的带宽不小于频谱宽度;激光脉冲 10 ns,因此探测器的带宽应不小于  $2/(10 \times 10^{-9})$  Hz. C30659-1060-R8B 雪崩光电二极管的带宽可达到 200 MHz,可以满足要求。

## 5.4 视频放大器

可变增益视频放大器型号 AD8369,带宽 600 MHz,增益 -5~+40 dB 可变;控制精度  $\pm 0.5$  dB,取最小接收功率  $3.0 \times 10^{-8}$  W 乘以雪崩管的响应度 200 kV/W,得到放大器的最小输入为 6 mV;最大信号假定在飞行高度最低 800 m,脉冲能量为最高处的 1/3,反射率为 0.8(8 倍)情况下  $3.0 \times 10^{-8}$  W  $\times (3.0/0.8)^2 \times (1/3) \times 8 \times 200$  kV/W = 225 mV。

回波放大器的数据线,用于一些参数设置。

来自主波的数字脉冲触发时间间隔测量卡开始计数,直至回波的数字脉冲到达后时间间隔测量卡的计数器停止计数,由计数值得到距离值<sup>[9,10]</sup>,周而复始。

扫描结构,采用美国 CTI 公司 6900 振镜自带的驱动板。使用 NI 数据采集卡进行振镜的控制。差分传输一路模拟量作为驱动板控制信号,并通过差分传输将传感器输出的位置信号送入采集卡进行量化和存储。采集过程通过主波脉冲触发。

## 7 结 论

针对国内机载遥感应用的需要,激光扫描成像系统已于 2007 年底建立完成,它可以得到被测地域的地表高度图和灰度图像<sup>[11~13]</sup>。其主要性能为:距离精度 35 cm;强度动态范围 8 bit;最大扫描频率 50 Hz;方位角测量精度 0.5 mrad;光学扫描视场最大范围  $\pm 25^\circ$ 。

## 参 考 文 献

- laser radar flight test experiments [C]. *SPIE*, 2005, **5791**: 138~151
- 2 Ove Steinvall, Ulf Söderman, Simon Ahlberg *et al.*. Airborne laser radar: Systems and methods for reconnaissance and terrain modeling[C]. *SPIE*, 1999, **3707**: 12~26
- 3 Mark C. Abrams. Progress in laser sources for lidar application; laser sources for 3D Imaging remote sensing[C]. *SPIE*, 2005, **5653**: 241~248
- 4 Su Jianzhong, Cui Yuping, Li Zengzhi *et al.*. Conceptual solutions for optical scanning lag angle of scanning LADAR[C]. *SPIE*, 2003, **4893**: 384~388
- 5 Cheng Xiangyang, Wang Haihong, Li Ning *et al.*. Two-scanner to get rapid and uniform scanning[J]. *Laser Technology*, 2001, **25**(6): 467~468  
成向阳, 王海虹, 李 宁 等. 二维扫描系统获得快速均匀扫描点阵的一种方法[J]. *激光技术*, 2001, **25**(6): 467~468
- 6 Cheng Yuwei, Zhangli, Hu Yihua *et al.*. Array detection technology of echo on earth observation laser imager [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2004, **23**(3): 169~175  
陈育伟, 张 立, 胡以华 等. 对地观测激光成像的回波阵列探测技术[J]. *红外与毫米波学报*, 2004, **23**(3): 169~175
- 7 Cheng Xiangquan, Guo Zhi, Wang Yuangang *et al.*. A study on laser echo rate based on satisfaction estimation [J]. *Acta Armament*, 2002, **23**(3): 332~335  
程相权, 郭 治, 王远钢 等. 满意估计下的激光回波率研究[J]. *兵工学报*, 2002, **23**(3): 332~335
- 8 Hu Yihua, Wangjianyu, Xue Yongqi. The waveform digitization laser return in airborn laser remote sensing imaging[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2001, **5**(2): 110~113  
胡以华, 王建宇, 薛永祺. 机载激光遥感成像的激光回波波形数字化技术[J]. *遥感学报*, 2001, **5**(2): 110~113
- 9 Yang Chengwei, Chen Qiansong, Lin Yan *et al.*. Measurement on time-interval in pulsed laser ranging and error analysis[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2003, **32**(2): 123~126  
杨成伟, 陈千颂, 林 彦 等. 脉冲激光测距时间间隔测量及误差分析[J]. *红外与激光工程*, 2003, **32**(2): 123~126
- 10 Zhang Li, Cheng Yuwei, Hu Yihua. A high performance time interval measurement and its application in laser imaging [J]. *Infrared Technology*, 2004, **26**(3): 71~74  
张 立, 陈育伟, 胡以华. 高性能时间间隔测量装置及其激光成像中的应用[J]. *红外技术*, 2004, **26**(3): 71~74
- 11 Peng Yong, Luo Zhongxiang, Xiang Rujian *et al.*. Primary experimental research of 532 nm pulse imaging lidar[J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(5): 398~400  
彭 勇, 雒仲祥, 向汝建 等. 532 脉冲激光成像雷达的实验[J]. *中国激光*, 2003, **30**(5): 398~400
- 12 Wang Chunhui, Cheng Xiangyang, Tian Zhaoshuo *et al.*. CO<sub>2</sub> Laser radar initiative scanning imaging experiment[J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(6): 569~572  
王春晖, 成向阳, 田兆硕 等. CO<sub>2</sub> 激光主动成像雷达扫描成像实验[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(6): 569~572
- 13 Yang Yi, Lu Zhukang, Hu Leili *et al.*. Numerical simulation of ranging performance for an airborne laser range finder [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(1): 75~78  
羊 毅, 陆祖康, 胡磊力 等. 机载激光测距机测距性能的数值仿真[J]. *光学学报*, 2001, **21**(1): 75~78