

文章编号: 0253-2239(2006)08-1172-5

# 激光测深系统中大动态范围压缩技术的实验研究\*

朱 坚<sup>1,2</sup> 臧华国<sup>1</sup> 贺 岩<sup>1</sup> 崔雪梅<sup>1</sup> 朱小磊<sup>1</sup> 陈卫标<sup>1\*\*</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)  
(<sup>2</sup> 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 分析了分通道、距离选通、光电倍增管变增益、正交偏振等多种技术相结合的方法,用以改善机载激光测深系统中激光回波的动态范围。并研制了相应的变增益部件,开展了水池试验以及海上现场试验。试验结果表明,多种方法相结合的技术可对水底信号的动态范围进行有效压缩,满足机载测深系统对浅海测量的动态范围要求;但正交偏振技术对信号测量压缩的改善效果并不明显。报道了试验过程中出现的光电倍增管后脉冲对水深测量的影响。对动态范围压缩技术进一步研究提供了有价值的参考。

**关键词:** 光学测量; 机载激光测深仪; 动态范围压缩; 距离选通; 增益控制; 偏振检测; 后脉冲

中图分类号: TN958.98 文献标识码: A

## Study on Large Dynamic Range Compression in Airborne Laser Bathymetry

Zhu Jian<sup>1,2</sup> Zang Huaguo<sup>1</sup> He Yan<sup>1</sup> Cui Xuemei<sup>1</sup> Zhu Xiaolei<sup>1</sup> Chen Weibiao<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)  
(<sup>2</sup> Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

**Abstract:** The techniques of channel separation, range gate, variable gain of photomultiplier tube and cross polarization are analyzed and combined to improve the dynamic range compression of the laser echo signal in airborne laser bathymetry. The corresponding device with variable gain is developed, and implemented in experiments in tank and sea in situ. Results show that the combined technique compresses the dynamic range of submarine signal effectively and meets the demand of shallow sea dynamic range for the airborne laser bathymetry. The technique of cross polarization does not improve the effect of measuring signal compression remarkably, and the influence of after pulse effect of photomultiplier tube on depth measurement is also reported. Valuable reference for further study on dynamic range compression is presented.

**Key words:** optical measurement; airborne laser bathymeter; dynamic range compression; range gate; gain control; polarization detection; after pulse

## 1 引 言

机载激光测深系统中技术难点之一是信号的大动态范围的处理能力,在几十米(几百纳秒)的测量范围内,信号的动态范围达到 5~6 个数量级,而目前的高速(GHz)数字化仪所能达到的动态范围只有 2 个数量级,无法将信号完整有效地记录下来。对

于激光测深系统,提高海底目标的衬比度是很重要的,因此需要减小太阳背景噪声和海水的后向散射噪声。目前采取的方法主要有:1)正交偏振技术,接收光信号与发射线偏振激光的偏振方向是正交的<sup>[1~12]</sup>,但这种方法同样降低了海底目标的信号强度;2)减小接收视场角,此法可以减小背景和杂散信

\* 国家 863 计划(2001AA613010-1)资助课题。

作者简介: 朱 坚(1981~),男,江苏人,中国科学院上海光学精密机械研究所硕士研究生,主要从事光电检测和信号处理的研究。

\*\* 通信联系人。E-mail: wbchen@mail.shcnc.ac.cn

收稿日期: 2005-08-31; 收到修改稿日期: 2005-12-01

号,对小目标探测是有效的,但同样会降低信号的强度;3)改变探测器增益,通过改变光电探测器的时间响应增益,来改变不同深度对应的接收增益,从而降低信号的动态范围。对微弱信号而言,此法具有一定的效果,但在海面强反射信号的照射下,效果有限;4)相干探测,利用诸如法布里-珀罗干涉仪作为相干探测器,只检测相干光,但作用距离有限;5)混合检测,将微波频率调制到发射激光上,接收时只处理微波频段的信号,此法也能提高衬比度,但是作用距离有限<sup>[2]</sup>。

因此,至今还没有一个独立有效的手段来解决整个动态范围。本文提出采用距离选通的、增益时变的光电倍增管,正交偏振技术和分通道测量技术等相结合的方法来改善激光测深系统的动态范围,并利用此法进行了水池和海上现场试验,取得了较满意的结果。

## 2 测量方法

双通道、距离选通、光电倍增管变增益和偏振接收方法如图 1 所示。其中发射激光是线偏振的,机载激光测深的后向散射信号被望远镜接收后,采取偏振方法分光,分成两个通道。分光镜为非偏振敏感的,分束比为 4:1,1/4 光信号进入浅水通道,3/4 进入深水通道。深水通道选用的高灵敏度的光电倍增管(PMT),浅水通道选用灵敏度相对较低的光电倍增管。为了同时兼顾测量浅水的海底深度,深水通道探测器采用大光阴极面的门控光电倍增管,具有高增益和大动态范围,有利于探测深水返回的微弱信号;浅水通道探测器采用小光阴极面的光电倍增管,具有较低的暗噪声和较快的响应时间,更适合探测浅水。

深水通道的动态范围是通过距离选通和光电倍增管变增益来实现的。在实验中,分别检验了国产

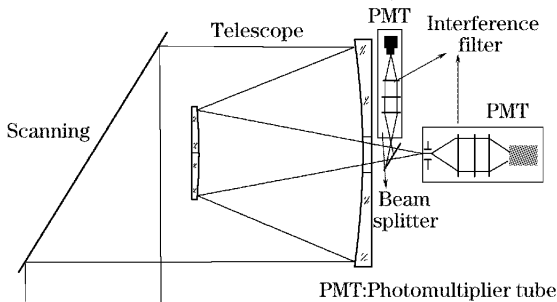


图 1 双通道偏振探测的激光测深系统的接收光路  
Fig. 1 Receiving setup of two-channel polarization detection in airborne laser bathymetry

的 GDB333, Hamamatsu 的 R1828 和 EMI 的 9893B/350 三种型号的光电倍增管。距离选通变增益技术控制时序信号如图 2 所示,光电倍增管在激光到达海表几米之前,处于关闭状态。超过海表后的  $T_1$  时刻即启动光电倍增管,并使得光电倍增管增益按照一定斜率逐渐增加,在  $T_2$  时刻达到最大。光电倍增管的变增益是通过改变倍增电极之间的电压差来实现的。针对不同的光电倍增管和不同海域的水质情况,可以选择不同的门控时序电路,因为门控起始时间、门控电压和增益斜率均可以改变。针对不同的光电倍增管,倍增电极上的电压有一定差异,因此需要优化处理。而且为了降低门控引入的噪声,倍增电极的级数不能太多,同时选择适中倍增电极有利于减小噪声。其中,GDB333 的连接电路前 6 级倍增电极之间并联一电容,保证门控电压在很短的时间内达到它的最大值,并使靠近门控的几个倍增电极的电压稳定,不受门控的影响;后面 8 级每级之间并联一电容以保持输出脉冲信号的线性度<sup>[3~5]</sup>。门控选择控制光电倍增管的 2、4、6 三个倍增电极,使得光电倍增管的总增益变化可以达到 2~3 个量级。另外,距离选通也相应减小了整个测量深度范围内的动态范围。由图 2 看出,海表的精确起始时刻对距离选通和变增益控制是非常关键的。因此,在系统设计中,增加一个海表自动判断的时序电路,根据上次测量精确海表来确定下次的门控起始时间。由于目前激光的重复频率非常高(达 1000 Hz),因此相邻激光点对应的海表时刻差别不大,这样可确保距离选通变增益电路的实现。

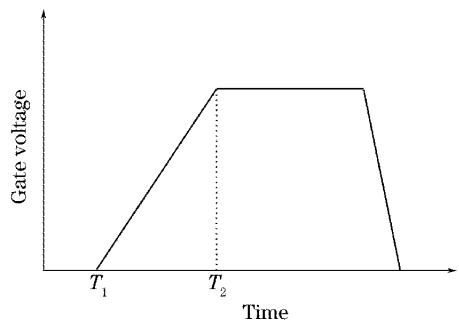


图 2 距离选通变增益技术示意图

Fig. 2 Time sketch of range-gated variable gain

另外还进行了偏振压缩试验,在光学发射部分和深水通道接收部分分别加起偏器和检偏器,调节使它们的偏振态正交,以减少水面回波信号的入光量。

采用不同的光电倍增管是为了检验距离选通变增益对不同光电倍增管的效果,同时检验其后脉冲

对测量的影响。

### 3 实验和结果分析

#### 3.1 水池试验

首先在水池中进行了验证试验,利用全固态蓝绿激光器,重复频率 1000 Hz,脉冲宽度 7 ns,峰值功率 1.0 MW。由于水池的长度有限,因此用水中增加反射镜的方式来延长水路,实验装置如图 3 所示。

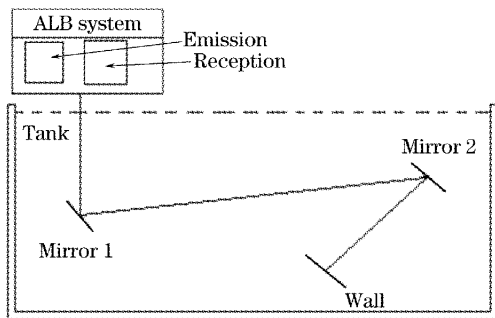


图 3 水池实验的布局框图

Fig. 3 Setup of experiment in tank.

ALB: Airborne laser bathymetric

水池试验中,光电倍增管选用国产的 GDB333。为单独观察门控特性,光电倍增管前未加偏振片,水面和池壁的回波信号全部进入光电倍增管。回波图形如图 4 所示。

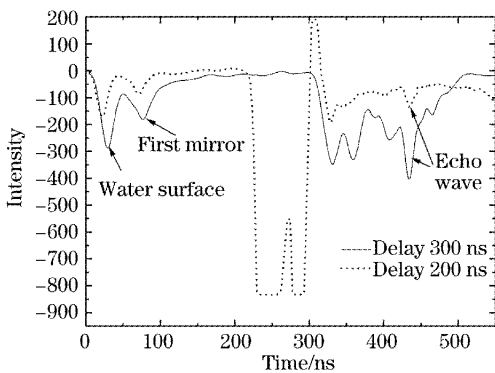


图 4 不同门控延时的采集波形信号

Fig. 4 Echo wave signals with different range-gated delay time

在水面信号到来之后,延时 200 ns,距离选通开启,光电倍增管增益按照设置的斜率开始增加。从图 4 中可以看出,由于门控的作用,水面强信号得到有效地抑制,只有 300 mV 左右。但即使门控没有作用在探测器上,由于海表反射信号非常强,探测器仍然输出较强的信号。由于数字化仪的动态范围非常有限,因此单独靠光电倍增管的变增益是不够的。

图 4 中,200 ns 后打开门控,光电倍增管输出信号仍然饱和。若延时到 300 ns 打开,门控开启时刻的电流输出大大减小,池壁回波信号变得很明显。

由于光阴面受到强光照射,因此无论门控信号何时打开,打开前,总有部分累计光子数突然输出,造成门控后,光电倍增管出现异常的信号。这是由于水面反射和浅水后向散射信号在栅极和第一倍增电极累积大量光电子,在门控打开瞬间被全部释放所致。从图 4 两个波形可以看出,由于水面和水体散射信号在栅极和第一极的累积导致门控打开时的大电流输出,甚至过冲,将池壁回波信号抬升了起来,对测量造成了较大影响。所以接收系统的水面返回反射信号相当关键。

从试验结果来看,距离选通和变增益结合基本满足机载激光测深的动态范围要求。为了检验偏振的压缩作用,又进行了偏振试验。除了增加发射和接收的偏振特性以外,光电倍增管仍然采用距离选通变增益。图 5 显示了在同一条件下有无正交偏振的结果,经比较可以看出,使用偏振检测后,可以适当减少光电倍增管接收到的水面反射和浅水的散射光信号,因此过冲现象得到很大改善,池壁的回波信号衬比度也有所提高。但同时采用偏振方法对改变信号的动态范围效果不明显,门控打开后,信号仍然饱和。

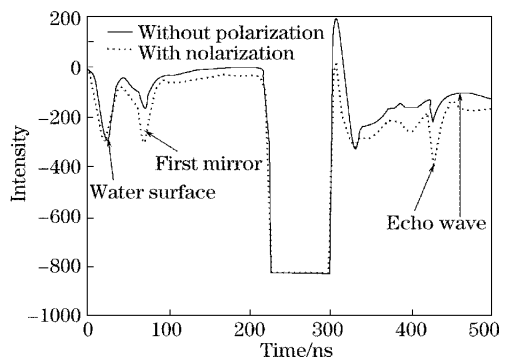


图 5 正交偏振检测和无偏振检测的测量回波信号比较

Fig. 5 Echo wave signal comparison with and without polarization detection

#### 3.2 海上试验

利用基于分通道、距离选通和光电倍增管变增益等技术,研制了一套机载激光测深系统,并开展海上试验。采用分通道的方法,信号动态范围得到了较好的解决,系统在实验过程中运行良好。飞机高度 500 m,激光器频率为 1000 Hz 的全固态蓝绿激光器。图 6(a)为两个通道同时测量到海底信号,这时深水通道的门控时间提前打开,因此

信号出现饱和。随着水深的增加,浅水通道已经没有办法获取海底信号,而深水通道仍然能够得到信号。从图 6(b)可以看出,深水通道的信号基本上都

在数字化仪的动态范围内,保持较好的线性。另外,采用分通道法后,系统的浅水测量能力得到很大的改善,从原来的 2.0 m 改善到 0.8 m。

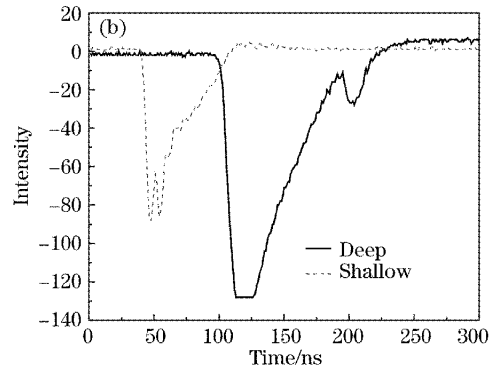
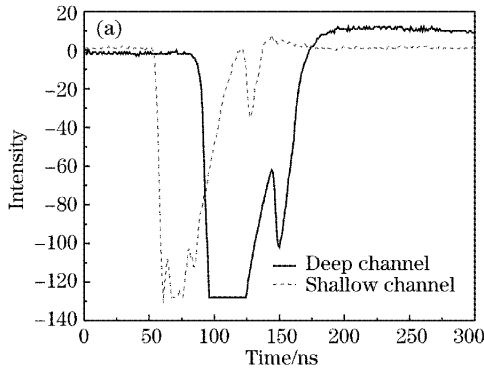


图 6 机载激光测深系统获取的双通道海底信号。(a) 浅水,(b) 深水

Fig. 6 Two-channel submarine return signals of shallow (a) and deep (b) sea in airborne laser bathymetry

### 3.3 后脉冲现象

无论水池试验还是海洋现场试验,由于海洋表面的强烈反射信号,造成光电倍增管出现较强的后脉冲现象。光电倍增管后脉冲的产生由多方面造成的,其主要原因是由于光阴极面和第一倍增电极之间的气体杂质被电离。这些离子在电场作用下,加速向光阴极面聚集,进而激发出大量的电子。后脉冲的幅度大小和光阴极面到第一倍增电极之间的分压电压大小以及入射光信号强弱有关。入射光信号越强,气体杂质被电离的产生离子数也就越多,后脉冲也就越大。由于在机载激光测深系统,光电倍增管不可避免地受到海面强激光反射的照射,因此很难完全消除光电倍增管的后脉冲。不同型号的光电倍增管的后脉冲大小和出现时间不同,因此,在系统中使用的光电倍增管必须对其后脉冲的时间和幅度特性进行检测,以便优化选择光电倍增管型号。

水池试验中分别使用了滨松(Hamamastu)的PMT R1828,GDB333 进行观察,发现 R1828-01 增益( $10^7$ )较国产管大,噪声小,但是其后脉冲产生时间较靠前,大约在门控打开之后 180 ns,和回波信号重合在一起,对 50 m 以内的信号测量造成很大影响;而国产 GDB333 的增益略小,但其后脉冲产生的时间较靠后,大约在门控之后 500 ns 出现,对 50 m 以内信号的测量不会造成影响,因此最终选用国产管进行试验。图 7 为 GDB333 和 R1828 测量时出现的后脉冲信号。

EMI 的 9893B/350 是为光子计数应用而设计蓝光增强的高增益光电倍增管,通过降低第一倍增电极返回到光阴极面光电子数(减小光阴极面到第

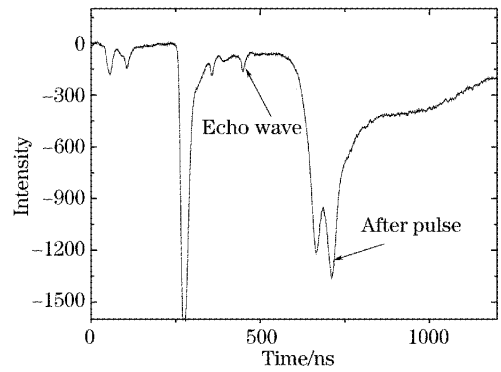


图 7 机载激光测深系统回波信号中的后脉冲

Fig. 7 After-pulse in return signal in airborne laser bathymetry

一倍增电极的通光面积),从而减少出现后脉冲的几率<sup>[8]</sup>。但在水池试验中使用,发现该光电倍增管的增益受到很大影响。究其原因,可能是降低了系统的接收视场角,同时光子计数的光电倍增管即使噪声低,增益高,但不能承受强光照射,因此不适合在机载激光测深系统中使用。

## 4 结 论

研制出的机载激光测深系统,采用了分通道、距离选通和光电倍增管变增益相结合的方法,基本解决回波信号的动态范围。通过水池试验和海上现场试验,得到了较好的实验结果,基本满足机载激光测深系统对我国南海浅海深度测量的需求。但是,从根本上改善动态范围,必须控制接收系统的入光量,如选用高速光电开关等。同时,可以考虑选用更多通道来进一步降低信号的动态范围,提高高速数字

化仪的动态范围,选用后脉冲概率小或者耐强光照射的光电倍增管。

### 参 考 文 献

- 1 G. D. Gilbert, The effects of particle size on contrast improvement by polarization discrimination for underwater targets[J]. *Appl. Opt.*, 1970, **9**: 421~428
- 2 L. J. Nullen, Amarildo J. C. Vieira. Application of radar technology of aerial lidar system for enhancement of shallow underwater target detection[J]. *IEEE. Trans. on Microwave Theory Technol.*, 1995, **43**(9): 2370~2377
- 3 Michael P. Bristow, Donald H. Bundyd. Signal linearity, gain stability, and gating in photomultiplier; application to differential absorption lidars[J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(21): 4437~4452
- 4 Michael P. Bristow. Lidar-signal compression by photomultiplier gain modulation influence of detector nonlinearity[J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(27): 6468~6479
- 5 Brian Concannon, V. Michael Contarino, Thomas P. Curran. Adjustable dynamic signal compression by photomultiplier space charge control[C]. *Proc. SPIE*, 1990, **1302**: 421~432
- 6 P. B. Coats. The origins of afterpulse in photomultipliers[J]. *J. Phys. D. Appl. Phys.*, 1973, **6**:1159~1167
- 7 M. Yamashita, O. Yura. Probability and time distribution of afterpulses in gap first dynode photomultiplier tubes[J]. *Nuclear Instruments and Methods*, 1982, **196**: 199~202
- 8 Wang Quandong, Chen Weibiao, Lu Yutian *et al.*. Analysis of relationship between parameter choice of airborne laser bathymetry and maximum penetrability[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(10): 1255~1260 (in Chinese)
- 汪权东,陈卫标,陆雨田等. 机载海洋激光测深系统参量设计与最大探测深度能力分析[J]. *光学学报*, 2003, **23**(10): 1255~1260
- 9 Yao Chunhua, Chen Weibiao, Zang Huaguo *et al.*. Study of the capability of minimum depth using an airborne laser bathymetry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(10): 1406~1410 (in Chinese)
- 姚春华,陈卫标,臧华国等. 机载激光测深系统最小可探测深度研究[J]. *光学学报*, 2004, **24**(10): 1406~1410
- 10 Yang Kecheng, Zhu Xiao, Li Zaiguang. Compression of large dynamic range returned signals by polarization detection in airborne laser bathymetry system[J]. *Chin. J. Lasers*, 2001, **A28**(1): 74~76 (in Chinese)
- 杨克成,朱 晓,李再光. 机载测深系统中回波信号大动态范围的偏振压缩[J]. *中国激光*, 2001, **A28**(1): 74~76
- 11 Zhu Xiao, Yang Kecheng, Xu Qiyang *et al.*. Airborne laser bathymetry phenomenological lidar equation [J]. *Chin. J. Lasers*, 1996, **A23**(3): 273~278 (in Chinese)
- 朱 晓,杨克成,徐启阳等. 机载激光测深唯像雷达方程[J]. *中国激光*, 1996, **A23**(3): 273~278
- 12 Zhu Xiao, Yang Kecheng, Li Zaiguang. The experiment of airborne laser bathymeter[J]. *Chin. J. Lasers*, 1998, **A25**(5): 470~472 (in Chinese)
- 杨克成,朱 晓,李再光. 机载激光测深试验[J]. *中国激光*, 1998, **A25**(5): 470~472