

## 机载激光测深光电倍增管变增益探测方法

朱 晓 杨克成 李再光

(华中理工大学激光技术国家重点实验室, 武汉, 430074)

**摘要:** 对机载激光探测海水深度的大动态范围信号, 提出了使用光电倍增管变增益探测方法来压缩其动态范围。给出了 GDB-333, GDB-49, R1333 光电倍增管增益控制特性, 压缩信号动态范围达  $2.5 \times 10^4$  倍, 满足了机载激光测深系统的要求。使用光电倍增管变增益探测方法探测到的海底回波, 也在文中进行了报道。

**关键词:** 光电倍增管 激光 测量 海水深度

## PMT gain changing measurement for airborne laser depth sounding

Zhu Xiao, Yang Kecheng, Li Zaiguang

(National Laboratory of Laser Technology, HUST, Wuhan, 430074)

**Abstract:** The return signals from airborne laser depth sounding have dynamic ranges that exceed the capabilities of the sequential measurement equipments. The study on gain controlling of photomultiplier tubes (PMT) GDB-333, GDB-49 and R1333 have been carried out. The results show that the signal dynamic range can be compressed to  $2.5 \times 10^4$  orders by controlling the electric potential of grid and eletromultiplier electrode. The method of changing PMT gain to detect signals from sea bottom is very compatible to airborne laser depth sounding.

**Key words:** photomultiplier laser measuring sea depth

## 引 言

机载激光测量海水深度的实质是测量激光水面反射和水底反射信号的时间差。从机载平台向下发射的激光脉冲, 经过空气-海水界面, 一部分被海水反射, 另一部分则进入海水。透射光进入海水之后, 海水对其进行选择性吸收和散射。部分散射光即海水的后向散射光与海底反射光一起组成回波光信号返回海面。经过海水-空气界面又折射回到空中, 经过大气, 被飞机上的探测器件接收。此信道较为复杂, 系统所探测到的海底回波是一种叠加在后向散射上的非常微弱的信号(见图 1)。由于海面反射的光信号比海底反射的光信号强得多, 同时, 后向散射的光能量随海水深度呈指数衰减, 海底反射回波光信号也随海水深度指数衰减, 因而, 机载激光测深系统所探测到的回波信号不仅光强微弱, 而且动态范围很大, 一般可达到  $10^4 \sim 10^6$ 。这样大的动态范围信号与现有的测量、数据存储和处理设备所能接受的动态范围

8 Paolini M, Sacchi G, Werdi C. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1988; 26(9):1989

\* \* \*

作者简介: 左都罗, 男, 1966 年 3 月生。博士, 副教授。现从事高功率  $\text{CO}_2$  激光器及激光加工等方面的研究。

( $10^2 \sim 10^3$ ) 是不匹配的, 必须对机载激光测深回波信号进行预处理, 压缩其动态范围以满足后续设备的要求。国外有关机载激光测绘海底地貌系统, 多数是采用 PMT 的变增益技术 (PMGC) 来解决大动态范围信号压缩的问题<sup>[1]</sup>, 有些是采用偏振滤波和对数放大器的方法来解决此问题<sup>[2]</sup>。我们在对光电倍增管的增益变化特性进行了研究的基础上, 设计成功了一种实用的 PMT 变增益控制系统, 经模拟光源实验, 测试该系统的压缩范围为  $10^5$ 。并通过实地机载实验证明了该系统的适用性和可靠性。

### 1 PMT 变增益控制的工作原理

PMT 的结构可分为光电阴极、电子光学系统、倍增结构、倍增系统和阳极五个部分。PMT 是将微弱光信号转变成光电子信号, 并使光电子信号获得倍增的光电探测器件, 其工作原理如图 1 所示<sup>[3]</sup>。图中 K 是光电阴极, C 为聚焦极(或栅极),  $D_1 \sim D_{10}$  为倍增极(或打拿极), A 为收集电子的阳极。

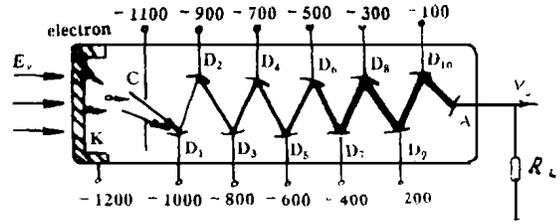


Fig. 1 Photomultiplier tube principle

在入射光子的激发下, 逸出光电阴极的光电子被电场加速后, 打到第一倍增极  $D_1$  上, 在高速电子的激发下,  $D_1$  产生二次电子发射, 这些电子又被电场加速后入射到第二倍增极  $D_2$  上, 激发出更多的二次电子, ……此过程一直持续到  $D_{10}$  极。最后, 经倍增的光电子被阳极 A 收集而输出电流。

PMT 一般都有 11 个左右的倍增极, 电子的倍增系数很大, 可达  $10^8 \sim 10^9$ 。因此, PMT 是一种灵敏度极高的光电探测器, 并且还具具有暗电流小、噪声系数低的优点。PMT 的电流放大倍数为:

$$G_m = I_k / I_A \tag{1}$$

式中,  $I_k$  为阴极电流,  $I_A$  为阳极电流。

由于电子在传输过程中会有损失,  $G_m$  可近似表达为:  $G_m = f(g\delta)^n \tag{2}$

式中,  $f$  为第一倍增极对阴极发射电子的收集率,  $g$  为倍增极间的传递效率,  $\delta$  是倍增系数,  $n$  是倍增级数。

通常  $f = 0.9$  左右, 对聚焦型结构  $g = 1$ , 非聚焦型结构  $g < 1$ 。

若阴极和倍增极发射的电子均被全部收集 ( $F = g = 1$ ), 则  $G_m = \delta^n \tag{3}$

倍增系数  $\delta$  不仅与构成倍增极的材料有关, 而且与倍增极的极间电压  $V_D$  有关。例如, 对于铯化铯倍增极, 倍增系数  $\delta$  可近似表示为  $\delta = 0.2 V_D^{0.7} \tag{4}$

所以,  $G_m = k_1 (0.2)^n V_D^{0.7n} \tag{5}$

对于银镁倍增极有:  $\delta = 0.25 V_D \tag{6}$

$$G_m = k_2 (0.25)^n V_D^n \tag{7}$$

从(6), (7)式可以看出, PMT 的增益是极间电压  $V_D$  的函数, 所以, 改变 PMT 的极间电压可以达到快速控制 PMT 增益的目的。

### 2 GDB-333, GDB-49, R1333 光电倍增管增益控制特性

针对机载蓝绿激光测深系统所适用的光电倍增管, 我们选取了三种线性聚焦结构的 PMT —— GDB-333, GDB-49, R1333 进行了增益控制特性研究。

图 2 是 GDB-333 光电倍增管在输入光强和工作电压恒定的情况下, 栅极电位从阴极电位 ( $V_K$ ) 变化到第一倍增极电位 ( $V_{D_1}$ ), 阳极输出电流随其变化的情况。横轴为栅极相对阴极的电位, 纵轴为 PMT 阳极输出电压信号。PMT 阳极负载电阻为  $75\Omega$ 。由图 2 知: 当栅极电位从阴极电位变化到第一倍增极电位的过程中, 光电倍增管的增益有一最佳值, 且最高增益是最低增益的 50 倍。

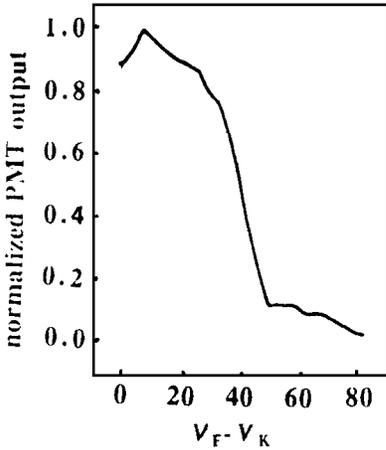


Fig. 2 GDB-333 gain vs  $V_{KF}$

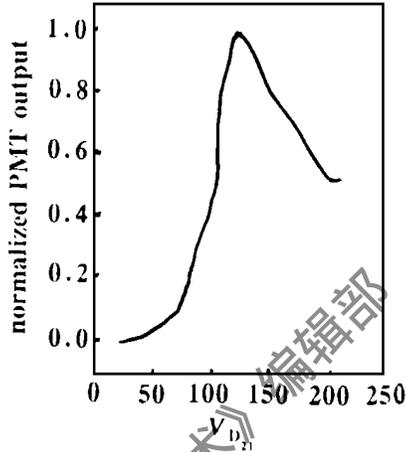


Fig. 3 GDB-333 gain vs  $V_{D_{21}}$

图 3 是 GDB-333 光电倍增管在输入光强和工作电压恒定的情况下, 第二倍增极电位从第一倍增极电位变化到第三倍增极电位, 阳极输出电流随其变化的情况。横轴为第

二倍增极电位相对第一倍增极的电位, 纵轴为 PMT 阳极输出电压信号。PMT 阳极负载电阻为  $75\Omega$ 。由图 3 知: 当第二倍增极电位从第一倍增极电位变化到第三倍增极电位的过程中, 光电倍增管的增益有一最佳值, 且最高增益是最低增益的 750 倍。从图 2、图 3 可知, 若同时控制 GDB-333 光电倍增管的栅极和第二倍增极, 其增益的静态控制特性的动态范围可达  $50 \times 750 = 3.75 \times 10^3$ 。

图 4 是 GDB-49 光电倍增管在输入光强和工作电压恒定的情况下, 栅极电位从阴极电位变化到第一倍增极电位, 阳极输出电流随其

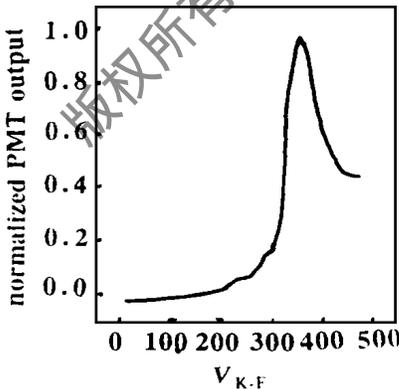


Fig. 4 GDB-49 gain vs  $V_{KF}$

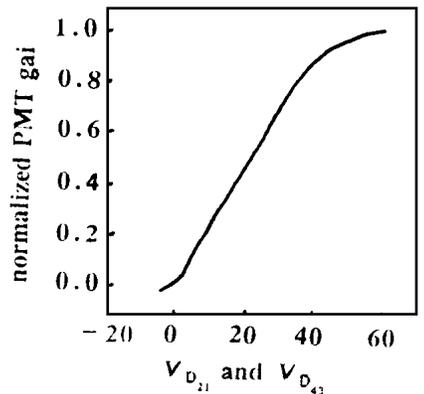


Fig. 5 R1333 gain vs  $V_{D_{21}}$  and  $V_{D_{43}}$

变化的情况。横轴为栅极相对阴极的电位, 纵轴为 PMT 阳极输出电压信号。PMT 阳极负载电阻为  $75\Omega$ 。分析图 4 知: 当栅极电位从阴极电位变化到第一倍增极电位的过程中, 光电倍增管的增益有一最佳值, 且最高增益是最低增益的 2000 倍。即改变 GDB-49 光电倍增管的栅极电位, 可使 PMT 的增益变化 2000 倍。

图 5 是同时改变 R1333 光电倍增管的第二倍增极  $V_{D_{21}}$  和第四倍增极  $V_{D_{43}}$  的电位, 阳极输出电流随其变化的静态控制特性。从实验结果可知, 当  $V_{D_{21}}$  和  $V_{D_{43}}$  均为  $-10V$  时, 基本可截

止阳极输出。当  $V_{D_{21}}$  和  $V_{D_{43}}$  达到 50V 以后, 阳极输出电流趋于饱和。因此, 当  $V_{D_{21}}$  和  $V_{D_{43}}$  在 -10V 到 50V 内变化时, R1333 光电倍增管的静态增益控制特性的动态范围为  $2.5 \times 10^4$ 。

从上述 GDB-333, GDB-49, R1333 光电倍增管增益控制特性研究可得结论: (1) 通过改变光电倍增管的栅极和倍增极的电位, 使光电倍增管的增益发生变化, 从而, 可将大动态范围的光信号压缩为可被后续信号处理设备接收的电信号。(2) 由于光电倍增管的栅极和倍增极的电位只需变化几十或几百伏, 光电倍增管的增益就变化  $10^3 \sim 10^4$  倍, 这就实现了低压控制 PMT 的增益, 而不是直接控制 PMT 的高压电源, 满足了机载激光测深需在几百纳秒内实现门控或变增益的要求。

### 3 PMT 变增益探测方法在机载激光测深试验中的应用和研究方向

图 6 是用 PMT 变增益方法在机载激光测深试验中探测到的海底典型回波<sup>[5]</sup>, 曲线上第一个脉冲峰是海面回波, 探测器 PMT 在水深 50m 以前处在低增益, 因而, 曲线上水面峰到水深 50m 处是一条直线, 当激光脉冲传输到水下 50m 时, 绿光探测器-光电倍增管由低增益变化为高增益, 曲线在 50m 处幅度增加, 随后是探测到的水深 50m 后的海水向后散射及海底回波信号。

从图 6 可知, 当 PMT 处于低增益时, 除水面反射信号外, 几乎没有水下的回波信号, 当已知水深时, 可预先设置 PMT 低增益到高增益的延迟时间, 这种技术可以满足基本试验的要求。但由于工作时要根据海底深度不同, 需随时调节门控脉冲的时间延迟, 同时, 在海底信号的探测中, PMT 增益是和海水的水质参数(特别是海水的后向散射)及水面的背景噪声相关联的<sup>[4]</sup>。在探测同一目标深度信号时, 水质条件好、背景噪声小, PMT 增益就可设置低一些, 反之, PMT 增益就应设置高一些。因此, PMT 变增益探测方法进一步研究的方向是要实现机载激光探测海底信号的 PMT 增益自动控制测量。与此相关的还必须研究海水衰减系数、单次散射率、后向散射系数、光束的空间扩展和时间扩展等与探测能力的关系及阳光、月光和波浪等对探测能力的影响。

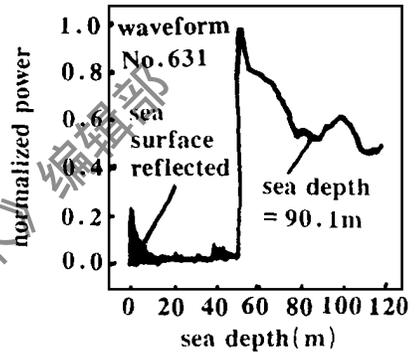


Fig. 6 The experiment waveform of airborne depth sounding

### 参 考 文 献

- 1 Penny M F, Abbot R H, Phillips D M *et al.* Appl Opt, 1986; 25(13): 2047
- 2 Guenther G C, Goodman L R. SPIE, 1978; 160: 174
- 3 叶嘉雄. 光电信号与信号处理. 北京: 科学出版社, 1997: 162
- 4 朱 晓, 杨克成, 李再光 *et al.* 中国激光, 1996; . A23(3): 273
- 5 朱 晓, 杨克成, 李再光 *et al.* 中国激光, 1998; . A25(5): 470

\* \* \*

作者简介: 朱 晓, 男, 1963年11月出生。副教授, 湖北省暨武汉市激光学会秘书长。主要从事激光雷达、激光技术的研究和开发。