

激光水下目标探测系统中的 PMT 变增益控制

卢益民 张峰 陈文革
(华中理工大学电信系, 武汉, 430074)

摘要: 文中讨论了激光在海水中的传播特性, 指出激光水下目标探测系统所接收到的目标反射回波是一种叠加在后向散射上的微弱光信号, 它们的能量是随深度呈指数规律衰减的, 且动态范围很大(可达 10^5)。为处理这种大动态范围的弱光信号, 文中研究了 PMT 的增益变化特性, 设计出了一种实用的 PMT 变增益控制系统, 该系统的控制范围可达 10^4 , 并已在一种激光水下目标探测实验系统中得到应用。

关键词: 激光 水下目标 探测系统 PMT 增益控制

PMT gain control in underwater laser object detection system

Lu Yimin, Zhang Feng, Chen Wenge
(Dept. of Electronics and Information, HUST)

Abstract: Based on the discussing of laser propagation properties in sea, this paper points out that the received energy consists of sea-water backscatter and object reflection, and the later is quite weak, and has a large dynamic range of 10^5 . So, it is necessary to have a gain control system of photomultiplier tube (PMT) to compensate the signal variation. This paper introduces a practical photo-multiplier gain control (PMGC) system, the system has better dynamic range of 10^4 and has been used in a underwater object laser detection system.

Key words: laser underwater object detection system PMT gain control

一、引言^[3]

机载蓝绿激光水下目标探测是从巡航的飞机上发射蓝绿激光脉冲, 然后实时探测其在目标表面反射的回波信号, 再根据激光脉冲往返传播的时间确定目标在水下的深度, 并对目标进行识别、跟踪, 从而达到激光水下目标探测的目的。

激光水下目标探测系统的组成如图 1 所示。

机载激光水下目标探测的主要优点是:

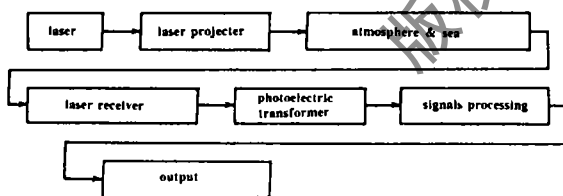


Fig. 1 Block-diagram of the system of underwater object laser detection

- (1)能够提供快速、大面积的搜索,机动性、隐蔽性好。
- (2)目标水下定位精度高。
- (3)水下目标自身的噪声强弱对系统的性能无影响。

美国、前苏联、澳大利亚、加拿大和瑞典等国均已开发出接近实际应用的机载激光水下目标探测系统。目前,我国也正在开展这项技术的研究。

二、探测系统接收到的回波信号

1. 海面反射回波^[4]

射向海面的激光脉冲,一部分被海水反射形成海面反射光脉冲信号。反射能量的大小,由反射率 ρ 决定, ρ 与海面状况密切相关,它包括泡沫反射率 ρ_f , 镜面反射率 ρ_m 和水下光的反射率 ρ_u , 即:

$$\rho = \rho_f + (1 - W)\rho_m + (1 - \rho_f)\rho_u \quad (1)$$

W 为白浪面积所占的比例。

2. 目标表面反射回波

进入海水的这部分光能量的辐射强度是随穿过海水深度的增加而呈指数规律下降的,即:

$$I(Z\lambda) = I_0(\lambda) \cdot \exp[-k(\lambda)Z] \quad (2)$$

式中, $I(Z\lambda)$ 为深度 Z 处, 波长为 λ 的光的辐射强度。 $I_0(\lambda)$ 为波长为 λ 的光在海面处透入水中的辐射强度。 $k(\lambda)$ 为海水对波长为 λ 的光的衰减系数。

对给定的海水, k 与波长 λ 有关。海水对可见光的衰减是由海水对可见光的吸收和散射两个因素引起的。当波长和海区一定时, k 为常数。它由吸收系数 μ 和散射系数 β 两部分组成, 即

$$k = \mu + \beta \quad (3)$$

这两种衰减作用均与海水的特性和光的波长有关。海水对蓝绿波段的光存在一个透过窗口, 这就是激光水下目标探测系统采用蓝绿激光的原因。

为了讨论方便起见, 忽略(2)式中散射作用的影响, 并假定吸收系数是恒定的, 取 $\mu = 0.15\text{m}^{-1}$, (实际上, 它是随深度的变化而变化的。)可以得到光信号随深度衰减变化的规律, 如图 2 所示。

在海水中下传的光, 遇到目标时被反射, 其反射的强弱与目标表面的状态及特性有关, 可表示为:

$$I_r(Z\lambda) = RI(Z\lambda) \quad (4)$$

式中, R 为目标反射系数。对于给定波长的光, 当目标确定时, $I_r(Z\lambda)$ 仅与目标的深度有关, 即它随目标深度的增加呈指数规律衰减。

从图 2 中可以看出, 光信号衰减的速度很快, 在水下 30m 时, 能量仅为海面处能量的 1%。

3. 海底反射回波

海底反射回波的变化规律与目标反射回波的变化规律大致相同, 均是随光透过海水深度的增加呈指数规律下降的, 它还与海底物质特性有关。

4. 海水的后向散射

海水对可见光的散射是海水中的悬浮粒子使一部分光偏离原来的传播方向而使在传播方

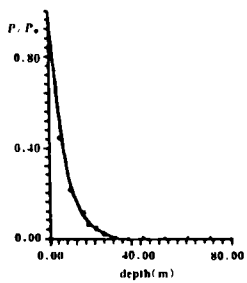


Fig. 2 Decay of laser beam vs depth

向上的光能减弱的一种衰减作用。研究表明,后向散射的能量也是随光透过海水深度的增加而呈指数规律下降的。后向散射对探测系统来说是一种固有干扰。

探测系统接收到的回波信号除了后向散射光信号外,按时间顺序分别为海面反射波、目标表面反射波和海底反射波,其典型波形如图3所示。

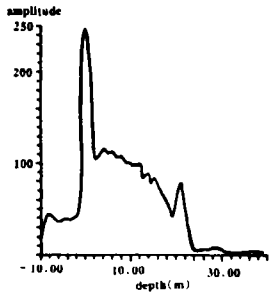


Fig.3 Typical wave of the laser signals received

由上面讨论可知,回波光信号有如下特点:

- (1)目标反射光信号非常微弱;
- (2)信号的动态范围大。

影响回波光信号动态范围的两个主要因素是海面的反射光脉冲和海水的后向散射,经计算,从水下10m到探测深度大约为100m的范围内,光信号的动态范围达到 10^5 。

若光电转换是线性的,则光电转换后电信号的动态范围则远远超过了电子处理电路所能承受的动态范围。所以,必须对回波信号进行处理,压缩其动态范围以满足后续设备的要求。

三、PMT 的变增益控制^[1,5]

PMT (photomultiplier tube)是将微弱的入射光转变成光电子信号,并使光电子信号获得倍增的光电探测器件。它的灵敏度高,暗电流小,噪声系数低,它在微弱光探测系统中得到了广泛的应用。

1. PMT 的增益控制特性

PMT 的电流增益表示为:

$$G = I_a / I_k = f(g\delta)^n \tag{5}$$

式中, I_a 为阳极电流, I_k 为阴极电流, f 为第一倍增极对阴极发射电子的收集效率, g 为倍增

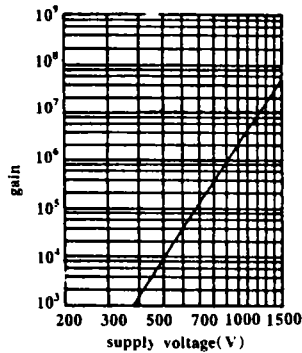


Fig.4 Typical gain vs supply voltage

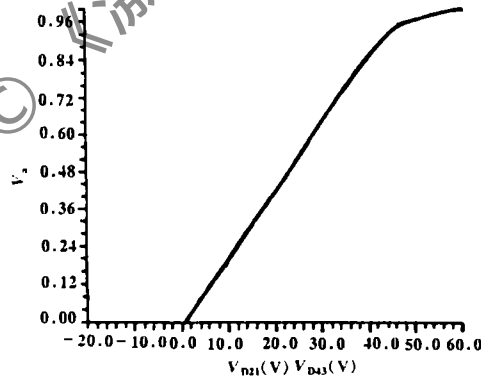


Fig.5 Relationship of gain (GDB546) to voltage of two electrodes

极间的传递效率, δ 为倍增系数, n 为倍增极个数。倍增系数 δ 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,表示为:

$$\delta = A \cdot V_D^n \tag{6}$$

式中, A 为常数, α 为由倍增极材料和结构决定的系数。所以,

$$G = f(gAV_D^\alpha)^n = kV_D^{n\alpha} \quad (7)$$

由(7)式, 可看出, 增益是极间电压 V_D 的函数, 所以控制 PMT 的极间电压可以控制它的增益。当 PMT 的分压电路确定时, 则 V_D 与供电电压有关, 所以改变供电电压也可控制它的增益。

图 4 为 PMT 的 G 与供电电压 V 之间的典型关系。图 5 给出了 PMT(GDB546) 的 G 与两个打拿极间电压的关系。

2. PMT 的变增益控制方案

(1) PMT 变增益控制的主要要求。a. 压缩倍数为 $10^3 \sim 10^4$, b. 增益控制起始时间可调, c. 增益控制时间范围可调, d. 变增益控制引入噪声小。

(2) 控制极的选择。为了减小增益控制时所产生的噪声, 选择中间打拿极 D_2, D_3, D_4 作为控制极。

(3) 控制电压的时间范围。蓝绿激光在 1ns 的时间内可往返海水深度大约 0.112m , 如果我们取最大探测深度为 100m , 则使 PMT 变增益的控制电压在 $1\mu\text{s}$ (可穿过 112m 的海水) 的时间内变化。

(4) 控制电压的幅度变化范围。由图 5 可以看出, 当 D_2 与 D_1, D_4 与 D_3 之间的电位差为 -10V 左右时, PMT 的阳极输出 V_a 基本上被抑制掉了, 当 V_{D21}, V_{D43} 逐渐向正电压方向变化时, V_a 逐渐上升, 当 V_{D21}, V_{D43} 达到或超过 50V 时, V_a 的变化趋于平坦。所以, 我们选择控制电压的幅度变化范围为 60V 。

(5) PMT 变增益控制系统的框图。

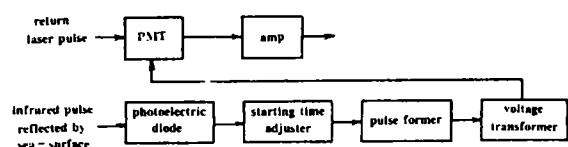


Fig. 6 Block-diagram of the PMT gain control

可以利用探测系统中测量飞机飞行高度的红外光海面反射光, 作为 PMT 变增益控制系统的同步信号。

3. 实验结果

图 7~图 10 给出了 PMT 变增益控制的实验结果, 它们是以两绿光脉冲作为光源而测试得到的。

图 7 为光强相同发光时间不同的两绿光脉冲作为测试光源, PMT 处于高增益状态时, 它输出的电脉冲信号。

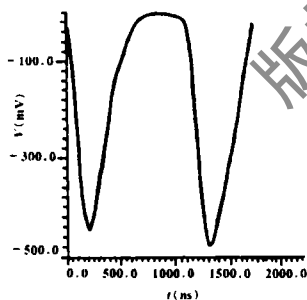


Fig. 7 Test result 1

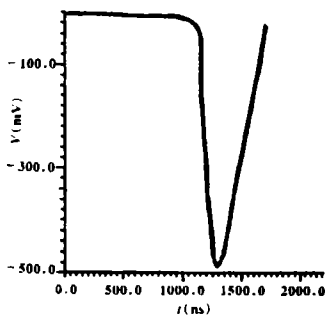


Fig. 8 Test result 2

版权所有 © 《激光技术》编辑部