

激光水下目标单脉冲成像探测技术研究

章正宇^{1,2} 周寿桓²

(¹西安电子科技大学技术物理学院, 西安 710071)
(²华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘要 介绍用于水下目标探测的 ICCD 单脉冲成像技术, 表明该技术方案可对大目标、复杂目标、远距离目标及较混浊水质实现单脉冲成像和目标识别, 实验验证了该技术方案的可行性及措施的实际效果。

关键词 单脉冲成像, 像增强, 距离门选通, 降噪

中图分类号 TN247:TN249 **文献标识码** A

Study of Under-water Target Detection by Single-pulse Imaging

ZHANG Zheng-yu^{1,2} ZHOU Shou-huan²

(¹ Technology Physics Academy, Xidian University, Xi'an 710071)
(² North-China Research Institute of Electronic & Optics, Beijing 100015)

Abstract This paper introduces ICCD single pulse imaging for under-water target detection, and makes it clear that this method gain advantages in many aspects. Though the analysis, also bring forward some new techniques in experiments. Experiments results shown in the paper prove the method and testify the techniques.

Key words subwater image, single-pulse image, intensify image, range-gated

1 引 言

在水下目标探测中,通过蓝绿激光成像来直接获得目标高分辨率二维强度图像效果是利用其它手段难以实现的;但激光在水中传输时,目标回波信号被水体散射光完全淹没,特别是射入水中时产生的强后向散射,将导致阴极面饱和甚至遭到损坏,如何克服极短时间内回波信号大动态范围变化,是激光水下目标成像探测首先要解决的技术问题。

2 成像性能分析

2.1 成像能力

单脉冲激光成像就是利用倍频激光器对目标发射一个或一系列较窄的光脉冲,经过水体 $\xrightarrow{\text{入射}}$ 目标 $\xrightarrow{\text{反射}}$ 水体的传输后在 CCD 系统光阴极面上接收成像,按下式可计算出接收功率^[1]:

$$P_r = \frac{2P_0 A_r k \rho_t A_t \exp[-(2\alpha + s)R]}{\lambda^2 R^4 (\theta_0^2 + 2sR\theta_s/3)}$$

式中, α 为水的吸收系数, s 为水的散射系数, R 为水中系统与目标距离, ρ_t 漫反射目标的反射率, A_t 为

目标等效面积, θ_0 为光束发散角, k 为光学系统透过率, A_r 光学系统的接收面积, θ_s 为等效散射角, $\theta_s = 1.3\theta_0$, P_0 为激光输出的平均功率, $P_0 = P_t \tau f$ 。其中, P_t 为激光发射峰值功率, τ 为激光脉宽, f 为激光重频。假设 $P_t = 5 \text{ mW}$, $\tau = 10 \text{ ns}$, $f = 60 \text{ Hz}$, $A_t = 0.1 \text{ m}^2$, $\rho_t = 30\%$, $\theta_0 = 10 \text{ mrad}$, $\theta_s = 13 \text{ mrad}$, $k = 0.8$, $A_r = 1.96 \times 10^{-3} \text{ m}^2$, $\alpha = 0.122 \text{ m}^{-1}$, $s = 0.043 \text{ m}^{-1}$ 。其中水质系数选取参照美海军 Enva 海水环境光学特性标准^[2]。另外, ICCD 光阴极面面积 $S_d = 24 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ 。

那么当 $R = 40 \text{ m}$ 时, ICCD 光阴极面功率密度 $P_r/S_d = 1.637 \times 10^{-10} \text{ W/m}^2$ 。已知 ICCD 的阈值灵敏度为 $S = 3 \times 10^{-7} \text{ lx(lm/m}^2)$, 由光通量与辐射量之间的转换关系及在 530 nm 处的光谱效率 $K(\lambda) = 589 \text{ lm/W}$, 求得 $\text{SICCD} = 5.1 \times 10^{-10} \text{ (W/m}^2)$ 。因此, 在上面所选取系统参数和水质系数情况下, 最大成像探测能力约为 40 m 左右。

2.2 成像分辨率

ICCD 接收成像系统的图像分辨率与光学系统参数、ICCD 像素尺寸和目标距离有关, 目标在光学系统焦面上的成像尺寸:

$$d \approx (D/R)f$$

式中, D 为目标尺寸, R 为目标距离, f 为焦距。

根据像素尺寸和识别目标的最低线鉴别率经计算可知 ICCD 系统分辨小目标能力很强, 但由于水体散射严重恶化了成像对比度和图像细节, 随着距离变远, 激光成像水中传函的 MTF 值将急剧降低, 如图 1 所示^[3]。

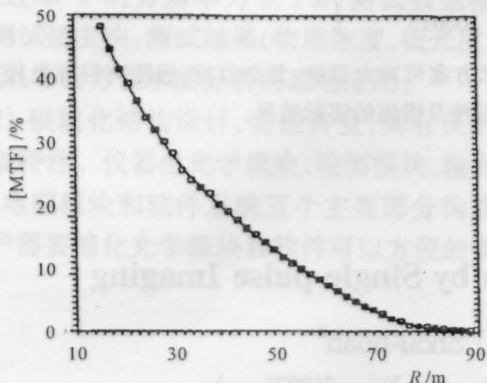


图 1 成像 MTF 值随距离变化曲线

Fig.1 Curves calculated with the range-dependent modulation transfer function of under-water target detection by single-pulse imaging

另外, 水质的好坏(用衰减系数或散射系数来标示)与探测距离一样在很大程度上决定了成像对比度特性, 从目标识别角度来看, 对比度的 MTF 值决定了成像能力, 美国海军研究实验室通过光学的水文辐射传输模型和海水环境试验, 获得识别圆盘的有效深度 D_{eff} 与总衰减系数 C 函数关系^[2]如下:

$$D_{\text{eff}} \approx 4.24/C$$

2.3 成像速率

如果采用 V/ICCD, 那么成像速率固定为 25 帧/秒, 与空气中相比, 水下目标移动速度较慢, 并不需要很高的帧频, 因此采用数字读出 ICCD, 使得读出

噪声比较小, 同时降低帧频。对于 M 行 \times N 列矩阵像素数 CCD 靶面来说, 读出过程如图 2 所示。

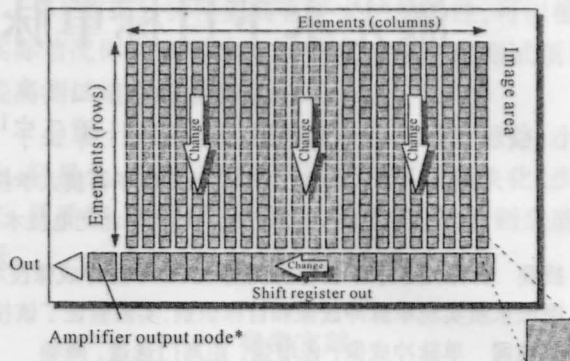


图 2 CCD 芯片的读出过程示意图

Fig.2 Sketch-map of CCD chip readout

读出时间计算如下:

$$t = t_0 \times M + t_1 \times N + t_2 \times M \times N$$

其中, t_0 为行移入寄存器时间, t_1 为列从寄存器移入输出放大器, t_2 为每个像素读出时间, M 为 CCD 像素的行数, N 为 CCD 像素的列数。

对于 512×512 像素数 CCD 来说, 按照目前国外数字式 ICCD 读出水平, 一般 t_0 为 $16 \mu\text{s}$, t_1 为 $16 \mu\text{s}$, t_2 为 $1 \mu\text{s}$, 那么大约最高速率 3~4 帧/s。

3 实验系统及某些关键技术

实验中, 根据激光在水中的传输窗口, 发射机采用 Q 开关倍频 Nd:YAG 激光器, 回波光信号由光学系统接收, 经过光阴极面后转变成光电子, 经过像增强器内部微通道的电子倍增, 撞击荧光体发出可见光, 并形成一定的保留时间, 这些光子的像通过光纤耦合到 CCD 各个像素上, 被探测、存储然后读出, 对水体和目标处返回光的选择是通过像增强器上的“门”开关来实现, 实验原理图如图 3。

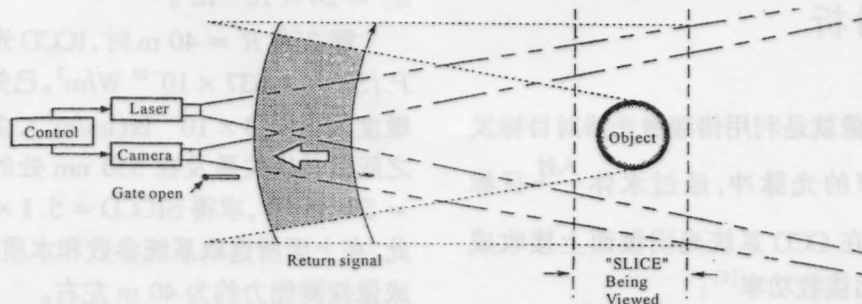


图 3 带波门的激光单脉冲成像探测系统示意图

Fig.3 Sketch-map of laser under-water target imaging by fast-gated ICCD

3.1 像增强

激光水下成像的主要困难首先是由于水体衰减

导致目标回波极弱, 通常 CCD 无法满足较远距离回波探测的灵敏度要求, 在 CCD 的前部通过光纤耦合

加上像增强器形成 ICCD, 由于接收的光信号在到达 CCD 之前就进行了“光”放大, 所以这种器件的灵敏度特别高。实际上像增强器是微通道板(MCP)电子倍增器: 将射入到光电阴极产生的光电子倍增, 在一个陶瓷真空管内将倍增后的电子收集起来, 并在输出空间位置上保持入射光的强度比例分布。它的电子电荷放大倍数达数千倍, 也就是说光阴极面的图像对比度也显著增加。

在激光水下成像中, 目标反射信号通过像增强器获得了增强, 但水体散射光和背景光也得到增强; 同时随着增益变大, 像增强器噪声也迅速提高, 因此对于光阴极面上成像原始对比度非常低而照度不太低的情况下, 单纯追求像增强器高增益对提高图像清晰度无益, 反而会引入倍增噪声, 降低图像信噪比。

3.2 距离选通

水下激光成像要解决的一个主要技术难度就是如何在极短时间内克服激光在水中传输的后向散射。在采用像增强器对目标信号回波进行“弱光”放大时, 激光后向散射也同时获得倍增, 回波动态范围极大, 一方面射入水中时产生的水体散射光会产生很强的散弹噪声, 甚至“灼伤”和致盲像增强器; 另一方面目标附近水体后向散射光信号叠加在目标回波信号上, 也会导致成像信噪比大幅度降低, 从而无法识别目标。

距离选通技术就是使 ICCD 工作在门控方式下, 采用短脉冲激光源, 由激光主波同步, 在目标回波信号到来时刻, 脉冲发生器产生一个幅度大约为负 200 伏左右的脉冲, 加到像增强器的光电栅极上, 导致像增强器瞬时从截止状态变为导通, 抑制掉大部分水体反射及散射能量, 仅允许目标反射光通过, 从而增强表现目标衬度。

距离波门宽度选择应该与激光主波脉宽相匹配, 考虑到随着距离变远, 除了准直光之外, 目标回波的前向散射光对成像将起到一定作用, 所以选通的持续时间应比激光的脉冲宽度 τ 稍为长一些; 另一方面, 接收器的选通宽度亦不宜过大, 否则会减弱对后向散射的抑制作用。另外, 在水下探测中, 探测距离短, 主回波间隔窄的特点要求距离波门的稳定性要高, 上升沿速度要快。

3.3 降噪接收

后向散射、背景噪声和系统噪声均对激光水下成像清晰度构成影响, 距离选通技术有效抑制了后向散射。随着距离变远, 背景噪声和系统噪声影响

越来越大。通过空间滤波, 窄带接收, CCD 致冷, 电路高次滤波和图像处理等技术可以有效降低背景噪声和系统热噪声, 提高成像信噪比。

4 实验研究及结果

测距能力和精度是激光水下目标单脉冲成像探测的基础, 通过对有效成像范围内任一未知目标测距并自动提取距离, 然后匹配控制发射光机, 接收光机及系统各参量, 实现直接单脉冲成像, 以满足快速侦察的需要。处理和未处理结果对比如图 4, 图 5 所示。

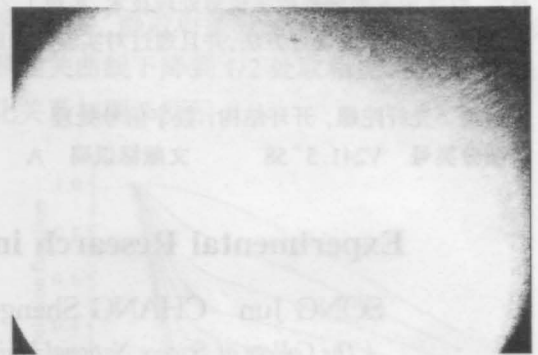


图 4 直接单脉冲成像结果

Fig. 4 Effect of laser under-water target imaging by no-gated ICCD

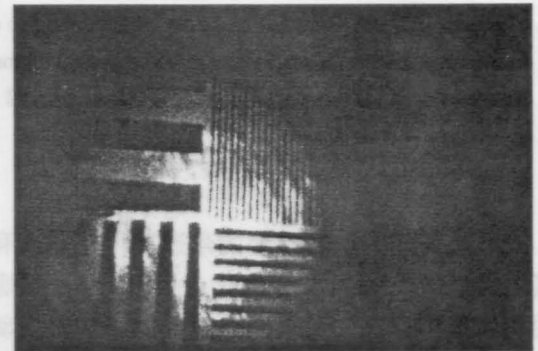


图 5 运用上述技术后成像结果

Fig. 5 Effect of laser under-water target imaging by range-gated technology

参 考 文 献

- 1 Georges R. Fournier. Range-gated underwater laser imaging system. *Opt. Engng.*, 32(9):2185
- 2 Jerry L. Gorline. Estimating the Effective Depth of Laser Imaging Systems in Various Ocean Environments. Naval Research Laboratory, 1996
- 3 刘雪明. 水下激光成像分辨率影响因素的理论分析. 电子器件, 1998, 21(1):13