

距离选通在水下激光成像系统中的应用

陈名松 李天松 何志毅

(桂林电子科技大学信息与通信学院, 广西 桂林 541004)

摘要 介绍了距离选通水下激光成像技术的原理及其技术进展,并具体设计与实现了一种新型的水下激光成像系统。距离选通成像方式是一种减小水介质后向散射的有效方法,利用水介质对可见光光谱的低损耗窗口效应,采用蓝绿波长的脉冲激光器提供主动照明,CCD 作为接收器,可在提高目标场景照度的同时,减小后向散射的影响,实现水下距离选通激光成像。实验证明,水下距离选通激光成像技术可以克服传统水下成像的缺点,具有成像清晰,对比度高,不受环境光源的影响等优点,已成为国内外重点研究的关键技术。

关键词 激光技术; 激光水下成像; 距离选通; 电荷耦合器件; 同步控制

中图分类号 TN247 **文献标识码** A

Application Research of Range-Gated Technique in Underwater Laser Imaging System

Chen Mingsong Li Tiansong He Zhiyi

(School of Information and Communication, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract The report provides the principle and advances of range-gated underwater laser imaging technology. A novel prototype underwater laser imaging system has been designed and developed. The range-gated technique is one of the effective methods to decrease the backward scattering of the water. By using the lower attenuation window for the water in the visible light spectrum, pulse laser with the blue-green wavelength has been adopted as an illumination source and CCD as the receiver. The range-gated underwater laser imaging system has been successfully fulfilled. The system can decrease the influence of backward scattering and at the same time the system can improve target luminance. The detail schematic principle and realization scheme have been analyzed. It has been found that the range-gated underwater laser imaging system could improve the imaging quality and the imaging distance by conveniently adjusting the pulse delay and the pulse width. It has been become one of the key techniques in underwater laser imaging research field.

Key words laser technique; underwater laser imaging; range-gated technique; charge coupled device; synchronous controlling set

1 引 言

把激光技术运用到水下成像过程中提供了一种远距离成像的方法,但是脉冲激光在水介质中传输和在大气中传输不同,由于水介质对光的吸收和散射,不但光能损耗很多,而且水介质产生的严重散射光,降低了成像质量。因此,必须采取相应的措施和技术手段来提高成像质量。

水下成像探测技术可分为两类:主动式和被动

式。脉冲激光水下成像系统是建立在海水对蓝绿光(480~540 nm)低损耗窗口基础上的一种新型的水下成像系统,是 20 世纪 80 年代末才出现的一种新的成像技术,发展很快,具有广阔的发展潜力,它是一种主动式水下观察成像系统^[1,2],在成像系统中激光起照明光源的作用。主动式激光成像探测是用激光照射水中目标(例如水雷、沉物等),经过传感器接收目标的反射信号,并将它转变成电信号,经电路

基金项目: 总装军事预研项目(1060741001030205)和广西高校科研基金资助课题。

作者简介: 陈名松(1967—),男,瑶族,湖南人,教授,硕士生导师,主要从事光通信、宽带光网络、光电子技术等方面的研究。E-mail: cms@guet.edu.cn

和计算机处理变成可显示的目标图像,是目前水下成像探测技术的主流。

影响水下成像的因素主要有三点:由于水中光的吸收和散射而使光能量衰减;后向散射使图像变得模糊;目标与接收器之间的前向散射同时也降低了图像的对比度^[3,4]。了解水介质的光学特性对水下成像的影响可以为实现水下激光成像系统提供合理的依据和方法。

2 激光信号在水中的传输特性

光波在水介质中传输,水介质会对光产生吸收和散射。光能量在水中损失的过程就是吸收,吸收导致激光的能量受到衰减。发生散射时,光子没有消失,只是光子的前进方向发生了变化。接收器接收的光信息主要由三部分组成:从目标反射并经水介质吸收、散射损耗后的成像光束;光源与目标之间水介质散射的后向散射光;目标与接收器之间水介质散射到较小角度并直接影响目标细节分辨率的前向散射光。此外,还有太阳光、微生物诱导荧光等,但影响水下激光成像的主要因素是散射光。水介质产生的散射光,不但使光能量损耗很多,缩短了成像距离,而且降低了成像质量。

激光在介质中传输时,激光与物质的能量转化遵从能量守恒法则

$$E_0 = E_R + E_A + E_P, \quad (1)$$

式中 E_0 为入射到介质表面的激光能量, E_R 为介质反射的能量, E_A 为介质吸收的能量, E_P 为激光透过介质后仍保留的能量。

激光能量被物质吸收后,激光的强度减弱。实验证明,对于各向同性的均匀物质,强度为 I 的入射激光通过厚度为 dx 的薄层后,其激光强度的相对减少量 dI 与吸收层厚度 dx 成正比。

2.1 激光信号在水中的衰减特性

激光在水介质中传播具有强烈的衰减,对于没有杂质的纯水,它对光的衰减也很严重。实验表明:水的衰减是光波长的复函数,它是由两个互不相关物理过程即吸收和散射引起的。

光在水中的吸收量随光的波长和水质的不同而变化。理论和试验证明:如果传输距离较短,与在大气中传输一样,激光在水中传输时的衰减规律也近似服从指数规律^[3]

$$P_r = P_0 \exp(-\alpha r), \quad (2)$$

式中 P_0 和 P_r 分别为传输距离等于 0 和 r 时的光功率, r 为传播距离, α 为包括散射和吸收在内的衰减

系数,单位是 m^{-1} 。衰减系数 α 不但与水质有关,而且与传播光束的波长有关。图 1 所示为不同波长光的吸收特性。

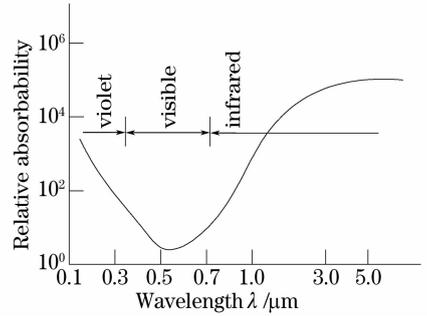


图 1 不同波长光波的相对吸收系数

Fig. 1 Relative absorbability of light propagation in different wavelengths

从图 1 可见,紫外和红外波段的光波在水中的衰减很大,在水下无法使用。在可见光波段,蓝绿光的衰减最小,故常称该波段为“水下窗口”。例如 $0.4900 \mu\text{m}$ 和 $0.6943 \mu\text{m}$ 波长光波的衰减长度分别为 11 m 和 2 m。这说明蓝光比红光在水中的传输性能要好得多。将(2)式做简单变换,就可得到光脉冲的作用距离方程

$$L = -\frac{1}{\alpha} \ln\left(\frac{P_r}{P_0}\right) = \frac{1}{\alpha} \ln\left(\frac{P_0}{P_r}\right). \quad (3)$$

如果把(3)式中的 P_0 和 P_r 分别理解为光发射功率和探测器的最小可探测功率,则 L 就是光脉冲在水下所能传输的最远距离。如果取 $P_0 = 10^6 \text{ W}$, $P_r = 10^{-14} \text{ W}$,对于 $0.4900 \mu\text{m}$ 波长的光波,其作用距离可达 500 m,对于 $0.6943 \mu\text{m}$ 波长的光波,其作用距离仅为 80 m,可见红光很难在水下应用。此外,水质不同,其衰减特性差异很大。远海区海水清洁,衰减距离较长,近海岸区海水浑浊,衰减长度大为减小。

由于光在水介质中的衰减是由水介质对光的吸收衰减和水中胶体粒子对光的散射所造成的,可以将 α 分为两部分

$$\alpha = a + b, \quad (4)$$

式中 a 为体积吸收系数, b 为体积散射系数。即使是清澈透明的海水,60%的衰减也是因为散射引起的,40%的衰减才是由吸收引起的,即 $a = 0.4\alpha$, $b = 0.6\alpha$ 。由此可知,水中光散射的衰减一般较大。

2.2 水介质对光的散射特性

一般海水的成分复杂,不仅有大量的无机物质由大陆河流及风力带入海洋,而且有各种大小、形状、性能不同的有机物质,如各种颗粒性腐质、浮游

动物、可溶性生成物。这些有机成分的分布是随机的，它们使海水的折射率和浓度不均匀，使光产生散射作用。

散射光的主要危害是降低水下激光成像接收系统的信噪比^[5,6]，还能产生强烈的背景噪声。随着成像距离的增大，画面反差降低，图像对比度下降，细节更加模糊，使水下光学成像变得十分困难，所以水下成像的距离最远一般都在十几米左右。另外，海水中不可避免地存在各种水中微粒和浮游生物以及水体的流动，使最后所成下图像中的噪声增强，进一步造成了水下成像图像质量的下降。

水中光散射是指光在水中传播时，受到介质微粒的作用，偏离原来直线传播的方向。水中散射有两种，即纯水本身产生的散射和由悬浮粒子所引起的散射。纯水的散射被当作是一种分子散射；而海水中的悬浮粒子的尺寸分布随水质不同而差异很大，它们大多属于大粒子范畴，即水体中粒子的平均半径远大于激光波长。散射的能量将集中在偏离传播方向附近很小的角度内。国际上把海水模型接近海和远海划分为三个海区，即 I 类、II 类和 III 类，I 类海区海水对光信号衰减小，III 类海区海水对光信号衰减大。无污染的海洋水主要是水分子散射，随温度、压力的变化较小；沿岸混浊水主要是大粒子散射，与悬浮粒子浓度有关。粒子的散射特性与粒子的大小相对于光的波长之比有关。波长 480nm 的情况下为单独由水分子引起的瑞利散射，瑞利散射仅仅考虑了纯水的总衰减系数的一小部分。对于较长的波长，水分子散射急剧下降，因而可以忽略。

另外，海水折射率的任何突然变化也能引起散射，但并不一定存在着实际的有形粒子。这种折射率的变化可能由于盐度和温度的不同引起的。折射率不同的水样的不完全混合也能够引起光学畸变和散射。正常温度和盐度梯度致使折射率产生的变化很小，因而引起的光的偏离和散射的角度也很小。但是这些梯度变化确实是使水下图像细节损失的原因之一。

2.2.1 前向散射

如果增大测量距离，并适当加大接收器的面积，则测量数据将偏离(3)式的计算值，所接收的功率将大于按该式所预计的值。其原因在于(3)式没有考虑前向散射的作用。为讨论方便，这里用照度来表示接收面上光辐射的大小。

光在传输方向上的散射称为前向散射，前向散射包含复杂的散射过程。单程散射而偏离光轴散射

的辐射由另外的散射体再次散射。有的多次重复这个过程，其中相当一部分重新进入光轴方向或稍微偏离光轴方向而进入接收平面，称此为多程散射。而初始的平行光束中直接到达接收面的辐射为单程辐射。这样接收面上的总照度 E_e 应为单程照度 E_e^0 和多程照度 E_e^* 之和，即^[3]

$$E_e = E_e^0 + E_e^*, \quad (5)$$

式中

$$E_e^0 = (I_e/L^2)\exp(-aL), \quad (6)$$

$$E_e^* = [(I_e k)(4\pi L)]\exp(-kL), \quad (7)$$

式中 I_e 为辐射强度， k 为多程衰减系数， L 为传输距离。

由此可见，前向散射使光束传输距离明显增大，传输距离越远，前向散射光的贡献越大。这种效应对水下照明有利，但对水下光束扫描和水下成像不利，它会使分辨率和目标背景对比度下降。

2.2.2 后向散射

光在与传输方向相反方向上的散射称为后向散射^[4]。

水下传输光束的另一个特点就是后向散射比前向散射强烈得多。如在大雾中行车时，有经验的驾驶员一般是开亮尾灯而关闭前灯，他借助前车的尾灯可以看清楚前车，但若打开前灯，那么大雾强烈的后向散射光会使他什么也看不见。在水下后向散射更为强烈，而且入射光功率越大后向散射光就越强。强烈的后向散射光会使接收器产生饱和而接收不到任何有用信息。因此在水下测距、电视、成像等应用中，要设法克服这种后向散射的影响。

采用如图 2 所示的距离选通技术，当光源发射的光脉冲朝向目标传播时，接收器的快门关闭，这时朝向接收器的连续后向散射光便无法进入接收器。当水下目标反射的光脉冲信号返回到接收器时，接收器的快门突然打开并记录接收到的目标信息。这样就能有效地克服水下后向散射的影响。

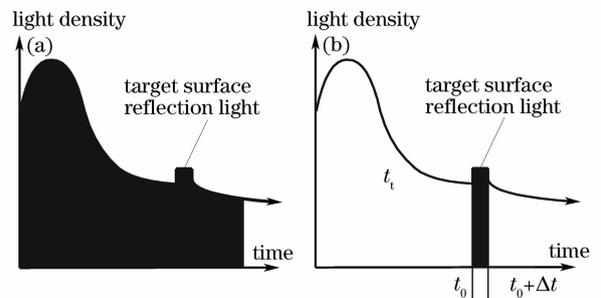


图 2 距离选通技术示意图

Fig. 2 Range-gated technique

3 水下激光距离选通成像

水下激光成像技术是集光、机、电技术为一体的综合性技术,它充分利用了激光的“高亮度”,“单色性”,“窗口效应”,“准直性”,“偏振性”,具有成像清晰、对比度高等优点。激光成像技术可以用来探测和识别水中目标,重构海底地形及海中结构物,生成较高分辨率的海底局部三维地形及结构物图像。

海水对于光频光谱具有一个很狭的窗口,就是 $0.5 \mu\text{m}$ 附近的蓝绿光,因此,人类在研制水下成像时,多采用蓝绿激光作为照明光源。利用激光的高强度、高准直性和单色性好等特性,在成像系统中选用激光作为光源可获得最佳的成像效果。现有的两种常规的水下成像方法是“距离选通技术”和“同步扫描技术”。这两种方法都采取了一系列措施来抑制大部分激光散射对光接收器的影响,有效地提高信噪比并改善其成像质量。为了尽量减少后向散射光对水下成像的影响,目前主要采用距离选通技术^[4,7]。

20 世纪 60 年代,国外开始研制距离选通激光成像系统,现在技术已经比较成熟。实践证明距离选通成像方式是一种减小水介质后向散射的有效方法。利用水对可见光光谱的可选择性消光效应,采用 $450\sim 550 \text{ nm}$ 波长的脉冲激光器提供主动照明,可在提高目标场景照度的同时,减小后向散射的影响,实现水下长距离的选通成像探测。水下距离选

通激光成像技术可以克服传统被动成像的缺点,具有成像清晰、对比度高、不受背景光影响等优点,在侦察、瞄准和探测等军事和非军事领域具有重要的实用价值和广泛的应用前景。

3.1 水下激光距离选通成像系统工作原理

用光学距离选通法消除不需要的目标反射回来的光脉冲,而让来自所要求的目标上的光通过距离选通系统,需要一个辐射很短促的、而且是很强的光脉冲的光源。为了使距离选通有效,光脉冲宽度必须小于探测器到目标的传输时间,接收器必须有一个快速动作的快门(光闸)。在脉冲光波从激光源到目标表面再反射回到接收器以前,这个快门一直处于“关闭”状态(图 2)。只有当某一距离上的目标反射光到达接收器的瞬间,接收器才打开选通门,让反射光进入接收器,从而可以消除大部分后向散射光^[3]。此种方法对解决由海水中的悬浮颗粒引起的后向散射问题很有效。

水下激光距离选通成像是建立在脉冲激光水下成像系统的基础上,利用距离选通原理成像的一种新型水下成像系统。距离选通成像系统是采用脉冲激光主动照明和 CCD 选通技术相结合,通过调节激光束的发散角来照射目标场景,将目标全部或目标的关键特征部位照亮,实现对目标的成像。它以时间的先后分开不同距离上的散射光和目标的反射

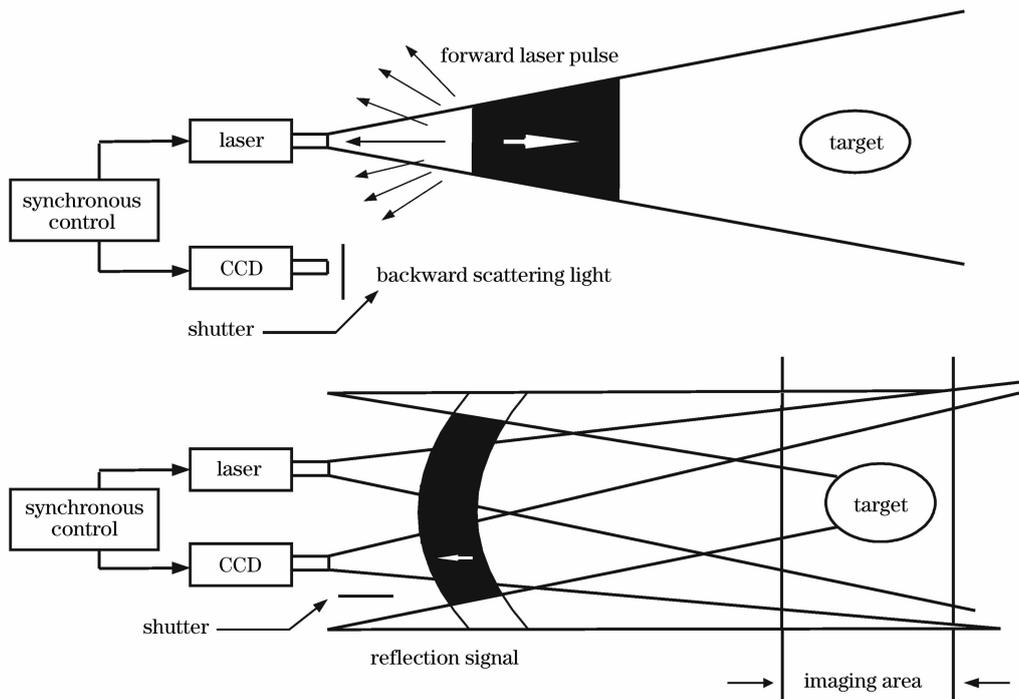


图 3 实验系统示意图

Fig. 3 Schematic diagram of testing system

光,根据不同探测距离上目标的反射光到达接收器的时间不同,决定接收器快门的不同开启时间,使由被观测目标反射回来的辐射脉冲刚好在 CCD 接收器选通工作的时间内到达接收器并成像^[1,2,7]。

距离选通成像系统具体工作原理如下:激光器发射很强的短脉冲,脉冲激光传输到目标上,对目标进行照射,由目标反射的激光返回到 CCD 接收器,当激光脉冲处于往返途中时,CCD 的选通门关闭,挡住来自悬浮微粒的后向散射光;当反射光到达接收器时,选通门开启,让来自目标的反射光进入 CCD。选通门开启持续时间与激光脉冲宽度一致。这样形成的目标图像主要与距离选通时间内的反射光有关。只有处在与快门打开的那段时间所相当的光传播距离上的物体,其反射光才能使 CCD 成像。而所有比这距离近或远的物体,他们的反射光都被快门挡住。距离分辨率由激光脉冲宽度和探测器选通门宽度决定。如果选通脉冲宽度和激光脉冲宽度都很窄,使得只能探测到目标附近的反射光,那么就能大大提高回波信号的信噪比,获得所观察目标的高分辨率图像。距离选通成像系统工作原理图如图 3 所示。

接收器的快门只是在所需的反射光到达时才打开一段短时间。接收器的选通门不局限在一个固定的距离上,它可以用连续不断的光脉冲在距离上进行扫描。于是,连续的拍摄就反映出一段距离移动着的窗内的物体。

3.2 距离选通系统同步控制技术

同步控制技术^[2]是距离选通激光主动成像系统的关键技术之一,主要是使激光器的脉冲光源和选通 CCD 接收机在时序上正确配合,并且提供选通门宽度、脉冲宽度和延迟时间选择,实现距离选通成像。

根据距离选通成像系统的要求,确定激光器的照明脉冲和相机选通脉冲之间的时序和相应的延时

关系,设计同步控制电路。同步控制电路主要由快门开启与激光照射相关的定时电路组成,定时时间取决于目标距离和激光脉冲往返传输需要的时间。

4 距离选通水下激光成像系统的实现

4.1 距离选通成像

系统成像的核心是距离选通的同步控制。在同步装置控制下,激光源首先发出脉冲激光经扩束后照射成像目标视域,此时数字相机快门闭合;而只有经过一定的时间,即脉冲光波从激光源到目标表面再反射回到接收数字相机的传播时间之后,快门开关才开启接收相应脉宽时间的光能量,然后立即关断。数字相机只有在快门开启的短暂时间内才能积累入射光能量,输出图像。由于积累时间短,则必然要求脉冲光能量足够强。同样,由于系统经过扩束后照射大面积的成像目标视场,也要求激光源的脉冲功率要足够强。

距离选通成像的实质是利用辐照光“时间域编码”的概念,通过快门开关的闭合与开启来屏蔽强烈的后向散射光噪声和接收目标反射直达光。从时间积累的角度上滤除了大部分的散射光噪声能量,从而提高了接收光强的信噪比,改善成像系统的质量和作用距离。

成像系统在距离选通同步控制机构的作用下,先由脉冲激光源发射一个激光脉冲,经扩束后照射成像目标。此时,数字相机的快门是关闭的。由于在激光脉冲向目标视域传播以及目标表面反射光返回相机镜头前的传播过程中,进入相机接收镜头的光能量都是能量密度很强的后向散射光噪声,而此时快门开关的闭合使得数字相机中的面阵 CCD 器件不会积累任何光能量,保证了避免积累较强的背景噪声。只有当成像视域目标的反射光信号大致到达相机的接收孔径时,快门才会开启以接收直达反

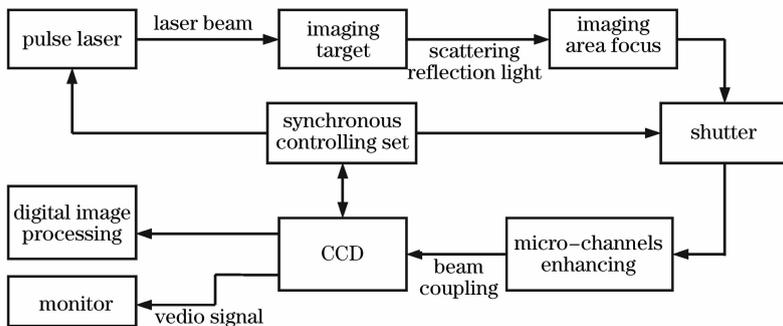


图 4 距离选通水下成像系统原理框图

Fig. 4 Block diagram of the range-gated underwater laser imaging system

射光信号。因此,距离选通成像从时域上屏蔽了大量的后向散射光噪声以及由此引起的其他背景光噪声,达到了系统前端接收光强信噪比最大的目的。

本系统通过采用大功率脉冲激光照射目标,利用 CCD 进行成像,其中通过控制 CCD 的快门来实现距离选通,从而抑制水介质所产生的强烈后向散射,提高了系统的成像质量和成像距离。具体系统构成图如图 4 所示。

由图 4 可以发现其中的脉冲发生器(即所谓的距离选通同步控制机构)是整个系统中的关键部分。它所产生的发光 Q 开关,CCD 接收机选通脉冲以及主时钟之间存在着一定的时序关系。这也是成像系统研究的重点以及同步控制机构作用所在。

4.2 系统参量估算

距离选通水下激光成像系统的反射信号功率可表示为^[8]

$$P_T(R) = \sum_i P_{li} \eta_{TL}(\lambda_i) \tau^2(R, \lambda_i) \beta(\lambda_i) \eta_{RL}(\lambda_i) \Omega(R), \quad (8)$$

式中 P_{li} 为照明激光功率, $\eta_{TL}(\lambda_i)$ 为光发射装置的光转换效率, $\tau(R, \lambda_i)$ 为范围为 R 以及波长为 λ 时的海水能见度, $\beta(\lambda_i)$ 为目标折射系数, $\eta_{RL}(\lambda_i)$ 为光接收装置的光转换效率, $\Omega(R)$ 为反射光固定接收角度可表示为

$$\Omega(R) = A_0/R^2, \quad (9)$$

式中 A_0 为光接收机的孔面积。

为了进行估算,假定以下因素对系统没有影响:电子前置放大器电信号的噪声、接收器件的暗噪声以及反射信号的散弹噪声。总体信噪比(S/N)可以通过帧平均化按照 $N^{-1/2}$ 的比率得以提高。其中, N 为平均帧数。反射信号的 S/N 可以通过除以(8)式中的信号表达式得到

$$S/N(R) = \frac{KP_1 \tau^2(R) A_0 R^{-2}}{P_n N^{-1/2}}, \quad (10)$$

式中 K 为平均衰减系数。

(10) 式和测试结果可以用来推算在其他分布范围、水质条件以及帧平均数(例如:不同的 N, R 或 τ) 的镜像系统性能。假定在一定的条件下,容许的 S/N 可以实现,那么,(10) 式可以用来确定需要的激光功率,从而实现不同条件下的相同 S/N 。

4.3 系统实现方法

此系统能够确定发光 Q 开关触发脉冲,CCD 选通脉冲以及主时钟之间的时序关系,来达到控制 CCD 距离选通成像。通过利用单片机控制可编程

逻辑器件,合成最小单位为 10 ns 级别的可调相位延时脉冲。经过不断的实验,分析和判断,从而确定相应的相位延时范围,以达到利用同步选通脉冲控制激光器 Q 开关和 CCD 快门实现距离选通,并最终达到距离选通成像的目的。

此系统除了远距离和高分辨率的优点外,由于它是单帧瞬时成像,因而能够避免成像目标和探测器相对运动而导致的图像扰动模糊。同样的,距离选通成像从时域上屏蔽了大量的后向散射光噪声以及由此引起的其他背景光噪声,达到了系统前端接收光强信噪比最大的目的。避免了积累大量的直流背景噪声而使系统能够抵抗严重的环境光强。这样都使距离选通成像系统可以在潜水区全天候工作,甚至可以垂直向上观察某些目标。由于可以从时域上削弱背向散射光,所以也不再需要激光源与探测器的分离接收。另外,蓝绿波段的脉冲激光源比连续波激光源具有更高的效率。

采用脉冲激光水下成像系统在模拟水槽中进行成像对比实验可以发现,采用同步控制装置对 CCD 的快门和脉冲激光进行控制的距离选通方式下(图 5)的成像质量和作用距离明显要强于不采用距离选通方式(图 6)时的成像效果。也就是说在保证相同成像质量的前提下,可以通过采用距离选通方式的脉冲激光水下成像系统来大大提高其作用距离。

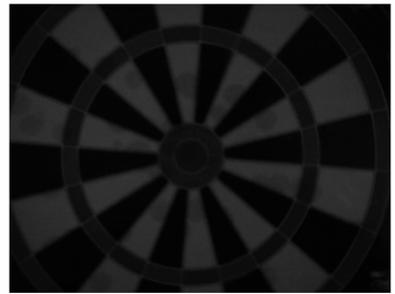


图 5 非距离选通方式
Fig. 5 Ungated mode

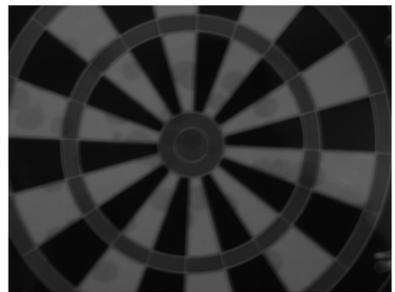


图 6 距离选通方式
Fig. 6 Range-gated mode

5 结 论

通过实验证明,利用业已成熟的 CCD 进行距离选通脉冲激光水下成像是完全可行的,可以通过这套系统来进一步研究影响成像质量和作用距离的各种因素,如水介质对脉冲激光衰减,脉冲激光的能量密度,脉冲激光的光束质量,不同反射系数的目标等。此外,利用 CCD 进行水下脉冲激光的研究,还可以充分利用图像处理软件对实验图像进行后期处理和分析,大大方便了整个成像系统的体制研究。

参 考 文 献

- 1 Chen Mingsong, Ao Faliang, He Ning. A research on the implementing of the underwater pulse laser system by the use of digital camera[J]. *J. Guilin Institute of Electronic Technology*, 2000, **20**(3): 1~4
陈名松,敖发良,何 宁. 利用数字相机实现脉冲激光水下成像系统的研究[J]. 桂林电子工业学院学报, 2000, **20**(3): 1~4
- 2 Chen Mingsong, Zhang Dekun, Zhou Shengyuan *et al.*. The design of the synchronization controlling set for the laser underwater imaging system by distance trigger[J]. *J. Guilin Institute of Electronic Technology*, 2001, **21**(3): 6~9
陈名松,张德琨,周胜源 等. 距离选通激光水下成像系统中同步控制装置的设计[J]. 桂林电子工业学院学报, 2001, **21**(3): 6~9
- 3 Liu Shonghao, Li Chunfei. *Photonics Technology and Application* [M]. Guangzhou: Guangdong Science and Technology Publishing House, Hefei: Anhui Science and Technology publishing House, 2006. 1933~1963
刘颂豪,李淳飞. 光子学技术与应用[M]. 广州: 广东科技出版社, 合肥: 安徽科学技术出版社, 2006. 1933~1963
- 4 Huang Youwei, Jin Weiqi, Wang Xia *et al.*. Theoretical optical backscattering model for staring underwater laser imaging[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(7): 1192~1197
黄有为,金伟其,王 霞 等. 凝视型水下激光成像后向散射光理论模型研究[J]. 光学学报, 2007, **27**(7): 1192~1197
- 5 Li Qi, Dong Guofeng, Wang Qi. Object classification simulation for ladar-passive infrared imaging combination[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(10): 1347~1352
李 琦,董国峰,王 骐. 用于激光成像雷达和被动红外成像复合的目标分类仿真[J]. 中国激光, 2007, **34**(10): 1347~1352
- 6 Guifen Xia, Baojun Zhao. Detection of air target based on multifractal analysis in a laser radar[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(1): 51~53
- 7 Xueming Liu, Jinlin He, Xiaohan Sun *et al.*. Instrument for collimating and expanding Gaussian beams for underwater laser imaging systems[J]. *Opt. Eng.*, 1998, **37**(9): 2467~2471
- 8 T. J. Kulp, D. Garvis, R. Kennedy *et al.*. Results of the final tank test of the LLNL/NAVSEA synchronous-scanning underwater laser imaging system (UWLIS)[C]. *SPIE*, 1992, **1750**: 453~464