

文章编号:1002-2082(2011)06-1059-08

水下目标光电探测技术及其进展

陈 超, 杨鸿儒, 吴 磊, 黎高平

(西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065)

摘 要:随着电子技术、激光技术和信号处理技术的发展, 光电探测技术应用于水下目标探测方面的研究重新成为热点。介绍了距离选通、激光线扫描、条纹管成像、载波调制、布里渊散射、偏振差分成像技术的原理、特点以及国内外发展现状, 重点分析和比较了国内外已有水下目标光电探测系统的性能水平和应用前景, 指出水下目标光电探测技术的最新进展以及发展趋势。

关键词:水下目标; 光电探测; 距离选通; 激光线扫描; 条纹管成像

中图分类号: TN249

文献标志码: A

doi: 10.5768/JAO201132.0601002

Underwater target detection with electro-optical system

CHEN Chao, YANG Hong-ru, WU Lei, LI Gao-ping

(Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

Abstract: With the developments of electronics, laser and signal processing, electro-optical systems for underwater targets detection is becoming an extensively investigated subject. The technical scheme, status, typical systems for underwater target detection with electro-optical technology were summarized, especially for range-gated imaging, laser line scanning and streak tube imaging technologies. The recent developments and trends in underwater targets detection were introduced. It is proved that the electro-optical detection technology has great potential in underwater target detection.

Key words: underwater target; electro-optical detection; range-gated; laser line scanning; streak tube imaging

引言

自从 1963 年, S. Q. Duntley 等人^[1]发现海水对 $0.45\ \mu\text{m} \sim 0.55\ \mu\text{m}$ 波段内蓝绿光的衰减比其他光波段的衰减要小很多后, 激光在海洋探测领域的作用越来越得到世界各国的重视, 也为水下目标探测技术开辟了一条新的途径。由于海洋环境的特殊性, 激光水下目标探测技术的发展主要面临的关键问题有两方面: 一是如何抑制海水后向散射, 提高成像对比度; 二是如何克服海水对激光能量的衰减。20 世纪 80 年代以来, 美国、澳大利亚、俄罗斯、加拿大、瑞典等国家在利用激光

进行水文和海洋勘测、水下军事目标探测等领域开展了大量研究^[2-9], 在提高水下目标成像对比度和探测深度方面相继提出了一些新的理论和方法, 有的已经成功获得运用。近年来, 激光水下目标探测的研究方向主要集中在 3 个方向: ① 距离选通技术^[10-11], 如美国 Arete 公司的“魔灯”和 Northrop Grumman 公司的机载快速灭雷武器系统 (RAMICS); ② 激光线扫描技术^[12-14], 如 Raytheon 公司的 LS4096 和 Northrop Grumman 公司的激光线扫描系统; ③ 条纹管成像技术^[15-17], 如美国的机载激光灭雷系统 (ALMDS)。

收稿日期: 2011-06-12; 修回日期: 2011-08-20

作者简介: 陈超 (1980—), 男, 重庆开县人, 工程师, 博士研究生, 主要从事光学测试技术等方面的研究工作。

E-mail: cyrus8081@163.com

1 水下目标光电探测技术

1.1 距离选通技术

距离选通方法一般采用 ICCD 作为接收系统,通过加载在阴极或者 MCP 上的高压选通脉冲形成一个高速开启和关闭的快门,当照射到目标区域的脉冲激光信号返回前,快门一直关闭,信号光抵达接收系统时,快门才打开。此方法可以较好地解决海水中悬浮粒子引起的后向散射问题,能有效抑制光源和目标之间的后向散射光对图像对比度的影响。图 1 为水下目标被动成像和选通成像的比较。

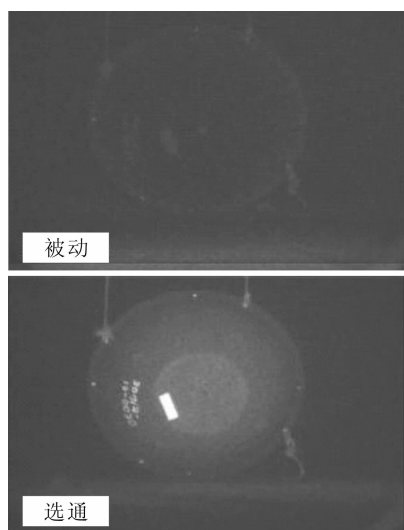


图 1 被动成像和选通获取图像对比

Fig. 1 Passive and gated images

1993 年加拿大 Fournier 等人^[18]采用自行研制的激光水下摄像机图像增强器(LUCIE)进行了水下成像试验。实验结果表明,在典型海湾水中,该系统比传统成像系统探测距离增加了 3~5 倍。1995 年美国海军研究实验室 McLean 等人^[19]采用半带宽 0.5 ns 的 532 nm 脉冲激光和选通时间可以低至 120 ps 的选通相机记录水槽中的金字塔形试验靶图像。该实验在行程为 4.572 m 的浑浊水(约为 6.5 个衰减长度)中记录下了间隔为 0.635 cm 的试验靶图像。2005 年丹麦理工大学 J. Busck 等人^[20]采用短脉冲距离选通系统从清澈水和海水中目标的二维图像序列中进行了目标三维图像的重构。同年美国海军研究实验室 A. Weidemann 等人^[21]采用 LUCIE 2 在港口水域进行了不同视场角下的水下目标成像分辨率的研究。该系统更加紧凑,改善了灵活性和人眼安全性。瑞典国防

研究院(FOI)也是开展距离选通技术研究较早的单位之一,对距离选通在陆上侦察和水下目标探测等领域的应用方面均作了大量的工作,图 2 为其研制的 LSV-W Aqua Lynx 距离选通成像系统和获取的水下物体图像。该系统所用激光脉冲能量在 26 mJ~29 mJ 左右,脉宽 7 ns~10 ns,像增强器增益达到 25 000 倍,最小选通宽度为 10 ns。距离选通技术现在已经是一种较为成熟的技术。在实用化系统中证明了在 4~5 倍衰减长度距离上该成像技术具有成像识别目标的能力,能在大于 6 倍衰减长度的距离上探测到目标。

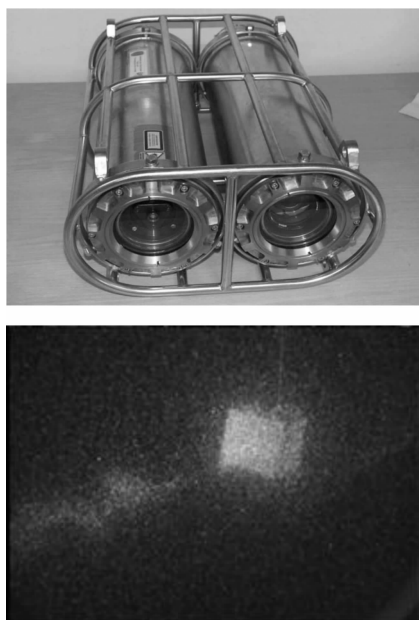


图 2 瑞典 FOI 的距离选通成像系统和获取的水下物体图像

Fig. 2 Range-gated imaging system and achieved underwater object image of Swedish FOI

北京理工大学^[22]采用了国产 1XZ18/18WHS 型高性能超二代像增强器和国产 DPL Nd:YAG 大功率脉冲激光器研制了最小选通门脉宽为 5 ns 的水下距离选通 ICCD 成像系统,并进行了水下成像实验。海军工程大学^[23]在 7 ns~50 ns 选通门宽下对不同开门时刻获得的水下目标图像进行了研究。西安应用光学研究所^[24-26]利用自行设计的距离选通水下目标探测系统对不同水质下的水下目标探测能力进行了实验研究,实现了二代像增强器的 10 ns 选通以及三代像增强器的 3.3 ns 选通。图 3 为外场实验中获取的激光照射光斑和水下目标的伪彩色图像。南京理工大学^[27]采用自行研制的循环步进延时距离选通系统进行了水下微

光三维成像研究,该系统激光脉冲宽度 15 ns,选通控制精度 2 ns,选通门宽 40 ns。华中科技大学^[28]在船池进行了激光水下成像实验,对放置在 5 m

到 23 m 深度下含有白色母 E 的面积为 0.5 m² 的正三角形黑色铁板进行了 3 ns~5 ns 的选通成像,获得了信噪比约为 10 dB 的图像。

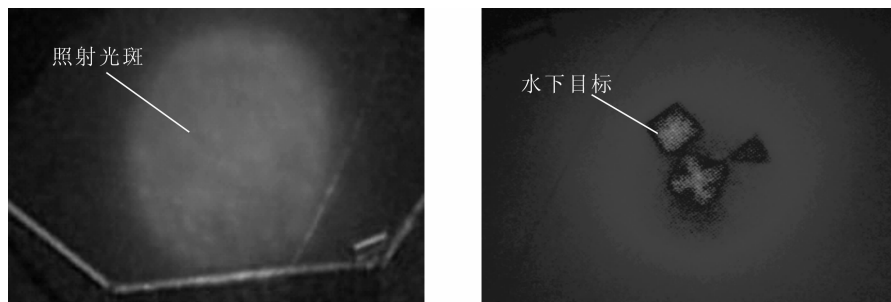


图 3 激光照射光斑及获取的水下目标伪彩色图像

Fig. 3 Laser spot and underwater target pseudo-color image

1.2 激光线扫描技术

激光线扫描系统分为连续激光线扫描和脉冲激光线扫描,通常采用的都是同步扫描技术。该系统的典型方案如图 4 所示,即把激光器与接收机设置在 2 个间距一定距离的地方,使照明光束扫描线与接收机在被观察区域相交成一个角度,这样使后向散射光尽可能少地进入接收器中。

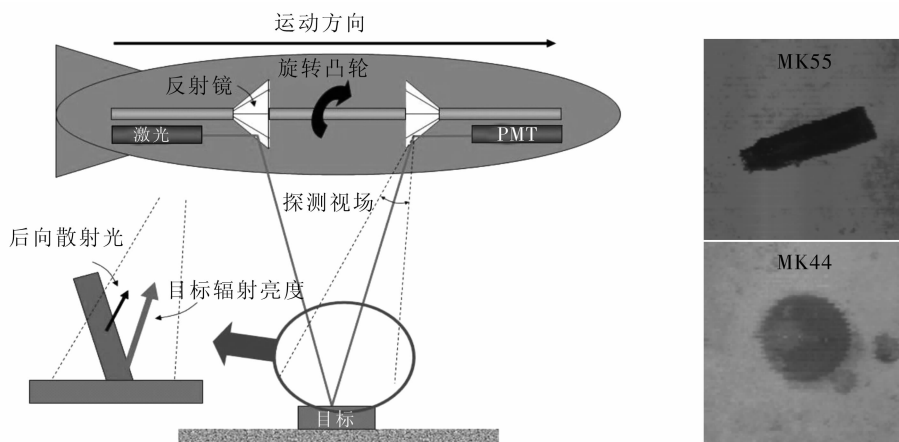


图 4 激光线扫描系统典型方案及获取图像

Fig. 4 Laser line scan system scheme and achieved image

连续激光线扫描系统必须通过增加光源和接收系统之间的距离来减少近场后向散射光。这必然会加大系统体积。因此近年来在实际应用中广泛采用的是脉冲激光加选通的方式。Gibby、Giddings 等人通过建立计算机模型指出在浑浊水中激光线扫描系统可以获取 6 倍衰减长度的目标图像。后来经过现场或实验室验证,在这个距离附近,该系统主要受对比度限制。为了抑制不利的散射光,采用脉冲激光加选通的方式有利于提高激光线扫描成像系统的性能。脉冲激光线扫描系统可以将作用距离扩大到 7 倍衰减长度。美国港口海洋研究所(HBOI)在水槽中进行了这 2 种体制成像系统的成像性能比较实

验。实验中,光源和接收系统间隔 23.4 cm,脉冲激光平均功率 2 W,连续激光功率为 3 W,行程 7 m (6.1 倍衰减长度),扫描速度 100 line/s,瞬时视场角 15 mrad,激光束散角 2 mrad~3 mrad。该实验结果充分表明脉冲激光线扫描在同样距离上对比度要好于连续激光线扫描系统。Northrop Grumman 公司的 SM-2000 激光线扫描器,采用的就是图 4 所示方案。其采用的是 532 nm 蓝绿激光,工作时通常置于直升机拖曳的 AQS-24 拖体内对水下目标区域进行推扫成像。图 4 右侧图片就是其获取的 2 种水雷目标的扫描图像。图 5 为 Raytheon 公司的 4 通道激光线扫描系统,采用 488 nm 氩离子激光、配置有 4

个接收系统(分别配置 488 nm、515 nm、570 nm、680 nm 干涉滤光片,其中后 3 个通道用于观察荧光)。图 6 为该系统 4 个通道分别获取的海底图像。



图 5 Raytheon 公司 4 通道激光线扫描系统
Fig. 5 Raytheon 4-channel laser line scan system

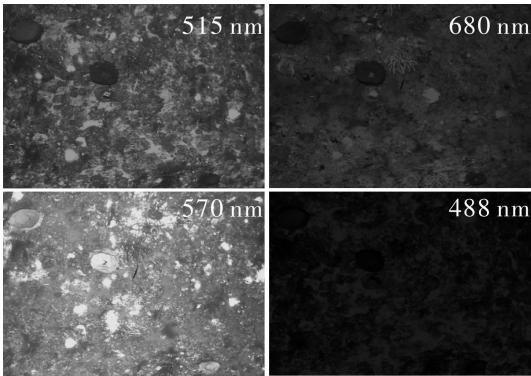


图 6 4 个通道获取的海底图像
Fig. 6 Seafloor image gained by 4 channels

中国海洋大学^[13-14]采用同轴同步飞线扫描方法进行了海试,该方法验证了采用激光输出功率 50 mW 情况下,混浊水质中观察距离可达到 4 倍衰减长度。并且视场(水下 $90^{\circ} \times 30^{\circ}$)较大,景深较大,无盲区。若激光的功率增大到 1 W 时,混浊水中视距可达 5.5 倍衰减长度,能达到水下工程的观测要求。

1.3 条纹管成像技术

条纹管成像系统工作原理如图 7 所示。接收光学系统将入射光信号成像在条纹相机狭缝上,从狭缝取出的一维空间光信号通过中继透镜聚焦在光电阴极上,在光电阴极上产生的光电子经加速极加速、静电聚焦极聚焦后,进入偏转系统(偏转板)。由于偏转系统上加有随时间线性变化的斜坡电压,不同时刻进入偏转系统的光电子受到不同偏转电压的作用,光电子束经像增强器(MCP)增强后到达条纹管荧光屏时,将沿垂直于狭缝的方向展开,在荧光屏上形成清晰可见的条纹图像(狭缝像)。经图像处理系统分析处理之后,可给出入射光信号的两维信息——即沿狭缝方向光强随空间变化的一维信息和垂直于狭缝方向上光强随时间变化的一维信息。通过外部机构推扫,则可形成一系列运动方向上的二维图像,通过重构可获得三维数据立方体(三维图像)。从三维数据立方体中可直接获取观察方向维的距离图像和运动方向维的对比度图像。

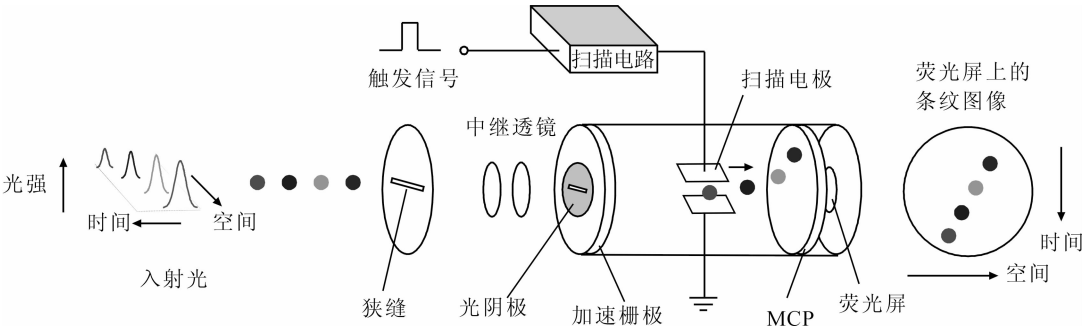


图 7 条纹管成像原理
Fig. 7 Streak tube imaging scheme

该成像方法成像距离约为 4~5 倍衰减长度,无机械扫描机构,可获取较高分辨率的三维图像,唯一不足就是由于采用扇形光束减少了照射光斑的光子密度。目前采用该技术的有美国机载激光灭雷系统-ALMDS 系统和 AQS-20 拖曳声纳系统。图 8 为携带条纹管成像系统的 AQS-20 工作

示意图。图 9 为条纹管系统获取的水下目标对比度图像。

哈尔滨工业大学^[17]从 2005 年起在国内开展条纹管激光成像雷达技术研究,并于 2008 年 8 月利用所研制装置在黄海海域开展了水下目标探测实验,获得了不同深度及不同表面材质的目标条

纹像,最大探测深度为 5 m。西安应用光学研究所近年来也在条纹管水下目标探测研究方面作了一些探索研究,图 10 为条纹管激光雷达采用的扇形激光光束和获取的水下目标的切片图像,图中目标位于水下 6 m 处。



图 8 AQS-20 工作示意图

Fig. 8 AQS-20 operation scheme

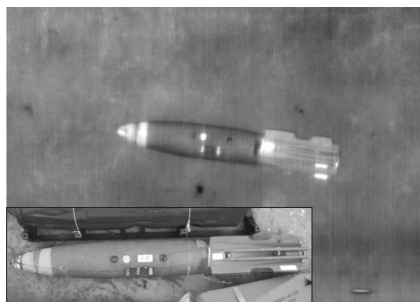


图 9 条纹管成像的对比度图像

Fig. 9 Contrast image with streak tube

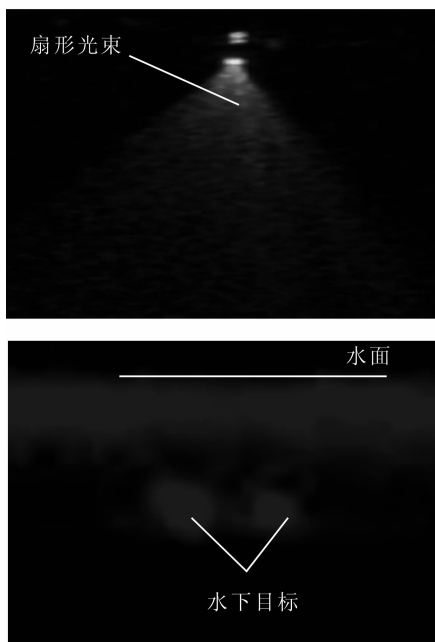


图 10 条纹管激光雷达扇形光束及获取的切片图像

Fig. 10 STIL fan beam and achieved slice image

1.4 其他探测技术

载波调制激光雷达技术是一种新的抑制后向散射的方法,被调制的光信号在水下传输时,未经散射直接到达目标的光保留了发射信号的频率特性;受到水体中散射体影响的光信号,不仅在时域上造成延迟,而且频率特性也发生了变化。通过频域上的选择处理,可以去除受到后向散射作用的信号,从而改善水下目标探测性能,提高信号对比度。目前该方法已有一些理论和实验研究,L. Mullen 等人^[30-32]建立了载波调制激光雷达理论分析中关键的辐射传输方程,并对调制雷达系统进行了理论评估,先后对输出功率为 1.5 W 的 532 nm 激光进行了 10 MHz、50 MHz 和 90 MHz 的载波调制实验,包括计算机仿真研究,以及利用光纤模拟海水信道环境进行的后向散射研究实验,还有在大西洋进行的载波调制激光雷达系统实地探测实验。通过这些研究,Mullen 等人得出了该技术对后向散射的抑制可达到 20 dB 以上的结论。2002 年法国的 Pellen 等人^[33]宣称进行了载波调制激光雷达系统的水槽实验,对脉冲宽度为 3 ns,单脉冲能量为 40 mJ 的 532 nm 激光脉冲进行了 1.5 GHz 的载波调制,利用添加粘土粉末的方法改变水质参量,实验验证了该方法在衰减系数不同的水中,都具有显著抑制后向散射的作用,目标对比度获得了显著增强。

2004 年北京师范大学刘大禾^[34]第一次提出了采用布里渊散射探测水下目标的方法。该方法是通过探测目标场的散射光谱而不是目标的散射光谱,采用调频探测技术,探测回波的频率移动,而不是回波信号的幅度。该装置由 F-P 标准具、ICCD 构成,通过实验分别测得了室温下 20 m 深处水中放有一包裹小黑布的木板和没有放置物体时的布里渊散射实验结果,通过同一级干涉圆环的个数判断水下是否有其他物体存在,有一个圆环为水下有物体,有 2 个圆环为水下无物体。实验中发现斯托克斯线的有无与水中是否有物体有直接的关系。

偏振成像技术^[35-36]是利用物体的反射光和后向散射光的偏振特性的不同来改善成像的分辨率。激光波长与海水及海水中悬浮颗粒和有机物分子的尺寸相当,一般遵从瑞利或米氏散射理论。根据散射理论,悬浮粒子后向散射的退偏振度小于物体后向散射光的退偏振度。如果在水下用偏

振光源照明,则大部分后向散射光也将是偏振的。如果采用适当取向的检偏器对后向散射光加以抑制,从而可使图像对比度增强。如当检偏器的偏振方向与光源的偏振方向平行,物体反射光能量和散射光能量大约相等时,对比度最小,图像模糊;而当两者偏振方向垂直时,接收到的物体反射光能量则远大于光源的散射光能量,对比度最大,图像清晰。

2 最新进展及发展趋势

美国一直在水下目标光电探测系统的研制和应用方面处于世界领先地位,主要应用于水雷探测、海洋渔业资源勘探和海底地形绘制等领域。其最新成果已成为目前美军重点发展的7套建制反水雷系统的重要组成部分(其中3套为光电系统)。这三套系统分别是采用距离选通成像技术的机载快速扫雷系统(RAMICS)、采用条纹管成像技术的机载激光水雷探测系统(ALMDS)和AQS-20高级机载反水雷声纳中的光电识别系统(EOID)。RAMICS采用的激光单脉冲能量约为50 mJ,带宽为4 ns~6 ns,束散角为19 mrad,重复频率为350 Hz,ICCD选通宽度小于5 ns;ALMDS采用的激光单脉冲能量为145 mJ,带宽为9 ns,束散角为30°,重复频率为350 Hz;AQS-20的EOID采用的激光单脉冲能量为4 mJ,带宽为4.5 ns,束散角为35°,重复频率为200 Hz。EOID中集成了2套条纹管接收系统和一套激光发射系统,而ALMDS系统集成成了4套条纹管接收系统和一套激光发射系统。这些系统代表了目前水下目标光电探测技术发展的最高水平。

窄脉冲距离选通和条纹管扫描技术通过图像的三维重建都能实现对目标区域的准三维成像,但是目前发达国家都在积极开展新的直接三维成像技术的研究。虽然条纹管已经发展了几十年,但是条纹管性能仍然受量子效率低、扫描非线性、几何畸变、需要高压电源、使用寿命短和可靠性较差等限制。美国Voxtel公司正在开发一种固态激光雷达芯片以取代条纹管。这种基于CMOS工艺的固态成像激光雷达接受器能实现条纹管激光雷达的所有功能,且花费、尺寸、质量和功耗等方面有明显优势。该固态成像激光雷达的集成电路包括一个由1 024个雪崩二极管组成的线阵列元件,每一个二极管都耦合到一个宽带、低噪声放大器

和采样电路上。采样电路能实现128种不同时间分辨率的采样,最小分辨率达到1 ns。

此外,美国Advanced Scientific Concepts公司^[37]也在开发一种称作凝视型水下3-D成像激光雷达(SULAR)的3-D相机技术。这种技术为单个相机进行三维距离分辨成像提供了潜力,每个像素都具有时间记录功能,它采用一个二维高带宽探测器像素阵列,并且每个像素被耦合到一个快速取样器件上。

3 结束语

综上所述,距离选通、激光线扫描和条纹管成像技术在水下目标探测领域已有成功应用实例,前景比较广阔。基于载波调制激光以及布里渊散射的水下目标探测技术目前离实用化还有一定差距,但研究价值明显。随着微电子技术等的发展,3-D相机技术在水下目标探测领域的应用有望在将来获得巨大发展,成为一种全新的光电探测手段。总的来说,从目前国际上已经研制成功的几种激光水下目标探测系统的实践证明,光电探测技术是一种比较有效的水下目标探测方法,通过提高激光的发射功率和探测系统灵敏度以及采用更先进的信息处理技术,现有光电探测系统的水下目标探测能力还能得到很大改善。

参考文献:

- [1] DUNTLEY S Q. Light in the sea[J]. J. Opt. Soc. Am., 1963, 53: 214-233.
- [2] LLOYD J M, TUBRIDY L H. Notional U. S. Navy ocean optical environmental measurement requirements[J]. SPIE, 2001, 4488: 8-12.
- [3] TULLDAHL H M, STEINVALL K O. Analytical waveform generation from small objects in lidar bathymetry[J]. Appl. Opt., 1999, 38(6): 1021-1039.
- [4] CAIMI F M. Technical challenges and recent developments in underwater imaging [J]. SPIE 2383: 408-418.
- [5] ZANEVELD J R V. Robust underwater visibility parameter [J]. Opt. Express, 2003, 11 (23): 2997-3009.
- [6] FEIGELS V I, KOPILEVICH Y I. Russian airborne lidar systems; comparative analysis and new ideas[J]. SPIE, 1999, 3761: 130-141.
- [7] FEIGELS V J. Lidars for oceanological research;

- Criteria for comparison, main limitations, perspectives [J]. SPIE, Ocean Optics XI, 1992, 1750: 473-484.
- [8] WEBER V L. A new method for the observation of underwater objects through rough sea surface [J]. SPIE, 6615:66150J-1-9.
- [9] DOLINA I S, DOLIN L S, LEVIN I M, et al. Inverse problems of lidar sensing of the ocean [J]. SPIE, 6615:66150C-1-10.
- [10] STEINVALL O, ANDERSSON P, ELMQVIST M. Image quality for range-gated systems during different ranges atmospheric conditions [J]. SPIE, 2006, 6396: 639607-1-17.
- [11] VOLLMERHAUSEN R, JACOBS E, DEVITT N, et al. Modeling the target acquisition performance of laser-range-gated imagers [J]. SPIE, 2003, 5076:101-111.
- [12] KULPT J, GARVIS D, KENNEDY R, et al. Development and testing of a synchronous-scanning underwater imaging system capable of rapid two-dimensional frame imaging [J]. Appl. Opt., 1996, 32 (19): 3520-3530.
- [13] 郑冰, 孙晓禾, 粟京. 一种水下激光成像的新方法 [J]. 中国海洋大学学报, 2006, 36(1): 119-122.
ZHENG Bing, SUN Xiao-He, SU Jing. A new underwater laser imaging method [J]. Periodical of Ocean University of China, 2006, 36(1): 119-122. (in Chinese with an English abstract)
- [14] 张博, 刘智深, 丁田夫. 水下激光线扫描探测系统的设计及试验 [J]. 青岛海洋大学学报, 2004, 34(4): 655-661.
ZHANG Bo, LIU Zhi-shen, DING Tian-fu. Design and experiment of an underwater laser line scanning system [J]. Periodical of Ocean University of China, 2004, 34(4): 655-661. (in Chinese with an English abstract)
- [15] GLECKLER A D. Multiple slit streak tube imaging lidar (MS-STIL) applications [J]. SPIE, 2000, 4035: 266-278.
- [16] OSOFSKY S T. Characterization of a vertical blurring effect unique to streak tube imaging lidar [J]. SPIE, 2002, 4488: 1-7.
- [17] 孙剑峰, 郜键, 魏靖松, 等. 条纹管激光成像雷达水下探测成像研究进展 [J]. 红外与激光工程, 2010, 39 (5): 811-814.
SUN Jian-feng, GAO Jian, WEI Jing-song, et al. Research development of under-water detection imaging based on streak tube imaging lidar [J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 39 (5): 811-814. (in Chinese with an English abstract)
- [18] FOURNIER G R, BONNIER D, FORAND J L, et al. Range-gated underwater laser imaging system [J]. Opt. Engineering, 1993, 32(9): 2185-2190.
- [19] MCLEAN E A, BURRIS H R, JR., et al. Short-pulse range-gated optical imaging in turbid water [J]. Appl. Opt., 1995, 34(21): 4343-4351.
- [20] BUSCK J. Underwater 3-D optical imaging with a gated viewing laser radar [J]. Optical Engineering, 2005, 44 (11): 116001-1-7.
- [21] WEIDEMANN A, FOURNIER G R, FORAND L, et al. In harbor underwater threat detection/identification using active imaging [J]. SPIE, 2005, 5780: 59-70.
- [22] 刘广荣, 黄睿, 金伟其, 等. 水下探测光电成像技术及其进展 [J]. 光学技术, 2004, 30(6): 732-737.
LIU Guang-rong, HUANG Rui, JIN Wei-qi, et al. Recent developments in underwater imaging technique [J]. Optical Technique, 2004, 30 (6): 732-737. (in Chinese with an English abstract)
- [23] 孙健, 张晓晖, 葛卫龙, 等. 距离选通激光水下成像系统的门控信号对图像质量的影响 [J]. 光学学报, 2009, 29(8): 2185-2190.
SUN Jian, ZHANG Xiao-hui, GE Wei-long, et al. Relation between imaging quality and gate-control signal of underwater range-gated imaging system [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(8): 2185-2190. (in Chinese with an English abstract)
- [24] 李燕, 杨鸿儒, 王学武, 等. 距离选通变增益光电倍增管探测系统的设计 [J]. 应用光学, 2009, 30(6): 1040-1044
LI Yan, YANG Hong-ru, WANG Xue-wu, et al. Design of range-gated gain-control photomultiplier [J]. Journal of Applied Optics, 2009, 30(6): 1040-1044. (in Chinese with an English abstract)
- [25] 陈超, 杨鸿儒, 吴磊, 等. 基于距离选通成像系统的水下目标探测技术研究 [J]. 应用光学, 2011, 36(4): 753-757
CHEN Chao, YANG Hong-ru, WU Lei, et al. Research of underwater objects detection using range-gated Imaging system [J]. Applied Optics, 2011, 36 (4): 753-757. (in Chinese with an English abstract)
- [26] 刘宇, 郭城, 张保民. 三代像增强器的高速选通控制设计 [J]. 南京理工大学学报, 2010, 34(1): 131-135.
LIU Yu, GUO Cheng, ZHANG Bao-min. Design of high-speed gated circuit for third image intensifier

- [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2010,34(1):131-135. (in Chinese with an English abstract)
- [27] 张毅,柏连发,陈钱,等. 循环步进延时距离选通水下微光三维成像[J]. 南京理工大学学报,2007,31(6):753-757.
- ZHANG Yi, BAI Lian-fa, CHEN Qian, et al. Circular step advance delay gate-ranged underwater 3D imaging[J]. Journal of Nan jing University of Science and Technology, 2007, 31 (6): 753-757. (in Chinese with an English abstract)
- [28] 杨述斌,彭复员. 激光水下距离选通成像门控实验研究[J]. 激光杂志,2010,31(3):10-11.
- YANG Shu-bin, PENG Fu-yuan. Gating-control experiment scheme design for laser underwater range gate imaging system [J]. Laser Journal, 2010,31(3):10-11. (in Chinese with an English abstract)
- [29] 张威,杨克成,傅博,等. 基于图像亮度特性统计的水下距离选通成像自动增益控制方法[J]. 光学与光电技术,2010,8(4):52-55.
- ZHANG Wei, YANG Ke-cheng, FU Bo, et al. A method of AGC based on image illumination characteristic statistics for underwater range-gated imaging systems [J]. Optics&Optoelectronic Technology, 2010,8(4):52-55. (in Chinese with an English abstract)
- [30] MULLEN L, HERCZFELD P R, CONTARINO V M. Modulated pulse LIDAR system for shallow underwater target detection[J]. IEEE, 1994, 14(6): 835-839.
- [31] MULLEN L, CONTARINO V M, LAUXA A, et al. Modulated laser line scanner for enhanced underwater imaging[J]. SPIE, 1999, 3761: 2-9.
- [32] MULLEN L J, ZEGER E P, KATSEV I L, et al. Modulated lidar system: Experiment vs. theory[J]. SPIE, 2001,4488: 25-35.
- [33] PELLEN F, OLIVARD P, GUERN Y, et al. Radiofrequency modulation on optical carrier for target detection enhancement in sea-water [J]. SPIE, 2001,4488: 13-24.
- [34] 戴瑞,弓文平,石锦卫,等. 基于布里渊散射的水下目标探测[J]. 激光与光电子学进展,2008,45(2): 64-68.
- DAI Rui,GONG Wenping,SHI Jinwei, et al. Submerged objects detection based on Brillouin scattering[J]. Laser & Optoelectronics Progress. 2008, 45(2):64-68. (in Chinese with an English abstract)
- [35] ROWE M P, PUGH E N, JR. , et al. Polarization-difference imaging: a biologically inspired technique for observation through scattering media[J]. Opt. Lett. ,1995,20(6):608-610.
- [36] TYO J S, ROWE M P, PUGH E N, et al. Target detection in optically scattering media by polarization-difference imaging [J]. Appl. Opt. , 1996, 35(11): 1855-1870.
- [37] STETTNER R, BAILEY H. Staring underwater laser radar(SULAR) 3-D imaging[J]. SPIE, 2001, 4377:57-64.