

文章编号: 1001-3806(2011)02-0255-05

合成孔径激光雷达研究进展

张小红¹, 杨敏², 郭亮³

(1. 海军驻西安20所军事代表室, 西安710068; 2. 总装备部驻华县地区军事代表室, 西安710068; 3. 西安电子科技大学技术物理学院, 西安710071)

摘要: 合成孔径激光雷达是合成孔径信号处理技术和激光技术的有机集合体, 是一种新体制主动成像激光雷达系统。首先介绍了合成孔径激光雷达的基本原理, 然后对国内外在合成孔径激光雷达方面取得的成果进行了概述, 通过对国内外系统的分析, 介绍了合成孔径激光雷达走向工程实现需要克服的技术难点。最后指出其在军事、科研以及灾害和环境检测等领域都有广阔的应用前景。

关键词: 激光技术; 激光雷达; 合成孔径; 成像系统; 实验

中图分类号: TN958.98 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2011.02.031

Research progress of synthetic aperture lidars

ZHANG Xiao-hong¹, YANG Min², GUO Liang³

(1. Navy Representative Office in 20 Institute, Xi'an 710068, China; 2. Military Representative Office of General Equipment Department in Hua County, Xi'an 710068, China; 3. School of Technical Physics, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: A synthetic aperture lidar is a new imaging system in combination of synthetic aperture signal processing and laser techniques. Firstly, the principle of a synthetic aperture lidar was introduced. And then, some good domestic and foreign experiment results of were described. After analysis of these successful experiments, the key techniques, which are needed to be overcome to make synthetic aperture come into practice were reviewed. Finally, the perspective in military, scientific research and inspection of disaster and environment were put forward.

Key words: laser technique; lidar; synthetic aperture; imaging system; experiment

引言

激光雷达是一种高灵敏度雷达, 它分辨率高、隐蔽性好、体积小、重量轻、抗干扰能力强、对多路径效应不敏感, 能探测隐身飞机等。但激光雷达波束窄, 不适用于大面积搜索; 受大气和气象影响大, 难以搜索和捕获目标; 其空间分辨率受光学口径的限制, 并随着距离的增加而下降。因此, 一种新体制激光雷达——合成孔径激光雷达 (synthetic aperture lidar, SAL) 应运而生, 并很快显示出了其广阔的应用前景。本文中简述了合成孔径激光雷达的基本原理, 概述了国内外合成孔径激光雷达研究现状, 进而分析了合成孔径激光雷达走向工程需要克服的关键技术。

1 合成孔径激光雷达基本原理

SAL 的基本原理和合成孔径雷达 (synthetic aperture radar, SAR) 相同, 都是通过目标和 (激光) 雷达平台之间的相对运动达到合成孔径高分辨信号处理的。区别主要是发射源不同。SAL 将单个真实光学镜头放在飞机等载体上, 载机作等速直线飞行, SAL 通过真实孔径透镜等间距地发射相干信号, 记录接收回波信号, 并进行适当的信号处理, 从而能够对同一目标单元的所有回波信号进行同相叠加 (即聚焦), 效果等效于长线阵同时收发, 这就是 SAL 形成合成孔径的原理。其原理如图 1 所示。其中, v 是飞行速率, r 表示目标

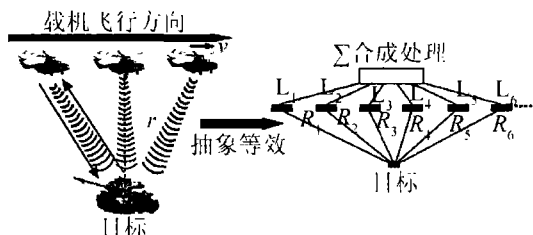


图1 合成孔径原理
到平台之间的距离。等效后, 表示目标到不同透镜 L

作者简介: 张小红 (1978-), 男, 硕士, 主要从事雷达技术总体的研究。

E-mail: yangmin781@sohu.com

收稿日期: 2010-04-26; 收到修改稿日期: 2010-07-13

的距离为 R 。

2 国外合成孔径激光雷达研究进展

20世纪60年代末,国外学者在SAL成像方面就进行了一些尝试,目前正从实验室走向工程应用阶段。近年来的一些重要进展主要有林肯实验室的固体激光合成孔径雷达系统、美国国家航空航天局(national aeronautics and space administration, NASA)实验室的扫描式激光合成孔径成像雷达、美国空军实验室的合成孔径成像激光雷达(synthetic aperture imaging lidar, SAIL)、诺斯罗普·格鲁曼公司的战术成像合成孔径激光雷达(synthetic aperture lidar for tactical imaging, SALT),以及日本通信实验室的红外SAL等。

2.1 林肯实验室的固体激光合成孔径雷达

林肯实验室于1994年首次报道成功研制了固体激光合成孔径雷达1维实验装置^[1],次年成功实现了2维的合成孔径激光雷达实验装置^[2],如图2所示。

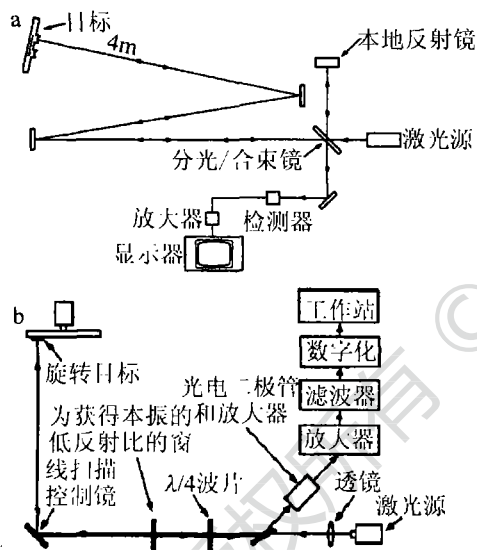


图2 林肯实验室的合成孔径激光雷达系统
a-1维实验系统 b-2维实验系统

系统以外差方式进行工作。固体激光雷达辐射源为连续运转的Nd:YAG激光器,工作波长 $1.06\mu\text{m}$,输出功率 5mW ,本振信号通过分束器进行分光。光电探测器为高速低噪的PIN光电二极管。发射光束传播若干米到达电机驱动的转盘,转盘上固定两个凹面反射镜,将光束反射回探测器,得到的多普勒差频信号由数字示波器进行记录,然后通过合成孔径信号处理技术得到图像。但是,该2维成像实验与传统的合成孔径原理不同,距离向高分辨率的获取并不是利用发射窄脉冲或大时宽带宽积的线性调频信号,而是增加距离向的天线口径得到的。图3为林肯实验室1维和2维的实验结果。1维成像的方位分辨率为 $250\mu\text{m}$,2维成像

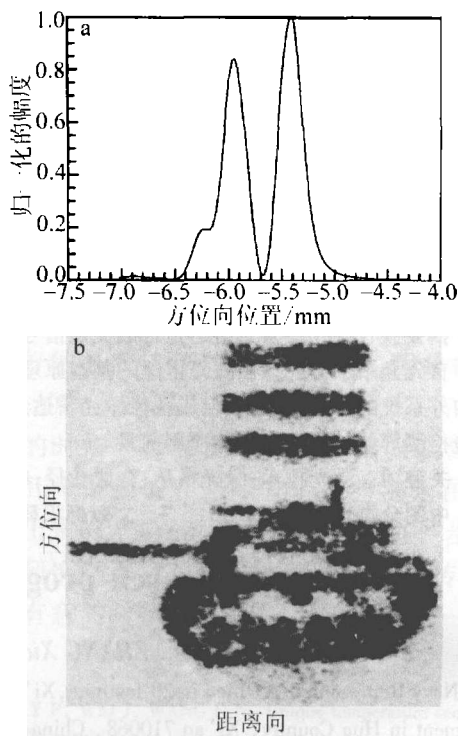


图3 林肯实验室的实验结果
a-1维实验结果 b-2维实验结果

利用距离向口径 1cm 、方位向口径 $250\mu\text{m}$ 的非对称镜头,实现了分辨率为 $250\mu\text{m} \times 250\mu\text{m}$ 2维图像。

2.2 美国NASA实验室的扫描式激光合成孔径雷达

2002年,美国NASA实验室的激光合成孔径成像雷达是世界上第1个扫描式2维SAL验证系统,实际上也是逆合成孔径雷达系统^[3]。实验结果如图4所示,辐射源采用可调谐激光器,工作波长 $1.55\mu\text{m}$,输

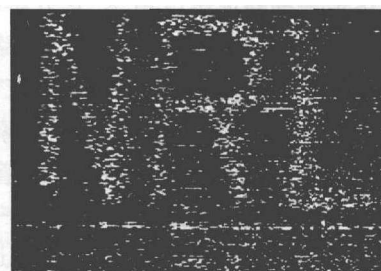


图4 美国海军实验室的实验结果

输出功率 5mW 。输出为经过线性调频的激光光束,线性调谐速度 10nm ,调谐时间 1s ,光源通过光纤从辐射源引出分束,目标与雷达的距离为 30cm (实验时采用 1m 的距离仿真 30cm 实际距离,有效口径为 $150\mu\text{m}$);光电探测器采用InGaAs光电二极管。在与相对运动方向垂直的方向上采用 200次/s 的频率进行扫描。由于光源调频的线性度问题,相对运动方向的分辨率是 $90\mu\text{m}$,大于预测的 $75\mu\text{m}$,距离方向的分辨率是 $170\mu\text{m}$ 。

2.3 美国空军实验室的SAL

2006年,美国空军实验室的激光雷达成像是第1

个真正意义上的激光合成孔径成像,也是第1次使用移动的孔径对漫散射目标进行成像^[4]。其实验结果如图5所示。该系统采用的基于光纤的实验系统,利

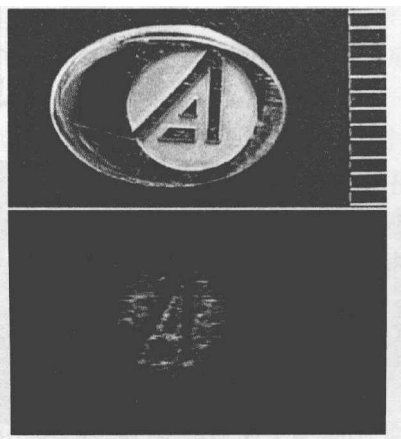


图5 Aerospace公司的实验结果

用可调谐激光器作为光源,将激光通过分光器分成3路,第1路作为信号通道,第2路作为参考通道用于补偿可调谐激光器发射信号非线性的相位误差,第3路作为各脉冲之间的同步信号。空军实验室不仅仅满足于成像,而且通过多次实验在成像算法上进行了研究。开发出基于参考通道的非线性相位补偿算法,实验结果不仅实现了良好的聚焦型合成孔径2维成像,而且对图像的细节进行了较好的处理,最终还对漫反射目标和镜面目标成像进行了对比。

2.4 诺斯罗普·格鲁曼公司的SALTI系统

2006年,诺斯罗普·格鲁曼公司成功设计、制造和演示了世界上首部合成孔径激光雷达系统^[5]。该项目是由美国国防高级研究计划局资助的战术成像合成孔径激光雷达(SALTI)计划,将合成孔径雷达技术成功引入到机载激光雷达领域。采用合成孔径的方法,激光雷达的分辨率不再受孔径尺寸的限制,因而可得到更高的分辨率。飞行试验验证了工作在光学频段的合成孔径雷达能够得到几乎接近于光学照片质量的图像,同时作用距离要比目前电光系统远得多,这是合成孔径激光雷达研究上的一大突破。该计划是把普通的微波合成孔径雷达和激光雷达结合起来,实现了全天时战场监视,并能提供3-D图像。为进一步开发这项新技术的应用潜力,美国国防高级研究计划局要求公司继续在提高作用距离和在不同战场环境下的感知能力方面开展工作。

2.5 洛克希德马丁相干技术公司的SAL实验

2009年,洛克希德马丁相干技术公司^[6]利用1550nm的光纤激光器作为激光源,利用2W的脉冲式的掺铒光纤放大器(erbium-doped optical fiber amplifier, EDFA)作为信号产生系统实现了1km远的合成孔

径激光雷达实验。该系统产生出10ns~100ns的脉冲,并且脉冲内相位受到调制,来实现7GHz的信号带宽以实现2cm的距离分辨率。信号的采集利用两个8GHz的A/D组合成I,Q通道实现信号的采集。

2.6 日本通信实验室的SAL实验

日本通信实验室于1998年使用CO₂激光器对近红外波段2维合成孔径成像的可能性进行了实验研究,取得了较大的进展^[7]。2000年左右在此基础上研制了一个1维的10μm波段的SAL系统。系统装载在一个线性移动的平台,在室内短距离范围内对目标发射和接收激光,并进行信号处理。实验结果与仿真得出的理论数据较为一致,对合成孔径成像实现了概念上的验证。研究人员下一步计划研制一个10μm波段的能够进行室外远距离实验的SAIL系统。

3 国内合成孔径激光雷达研究进展

国内紧跟国际研究前沿,对SAL成像理论和技术的研究取得了一系列的成果。西安电子科技大学、中国科学院上海光学精密机械研究所、中国科学院上海技术物理研究所等多家科研院所和高校已报道开展了SAL成像的理论和技术研究。

3.1 西安电子科技大学的SAL实验

我国首次成功的合成孔径激光雷达实验的报道是2008年6月,西安电子科技大学雷达信号处理国防科技重点实验室和激光实验室成功获得了国内首幅室内SAL图片^[8]。其系统实验装置如图6所示,系统框

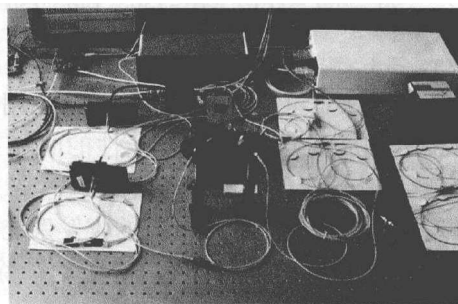


图6 西安电子科技大学的系统照片

图如图7所示。该实验从逆合成孔径成像的原理出

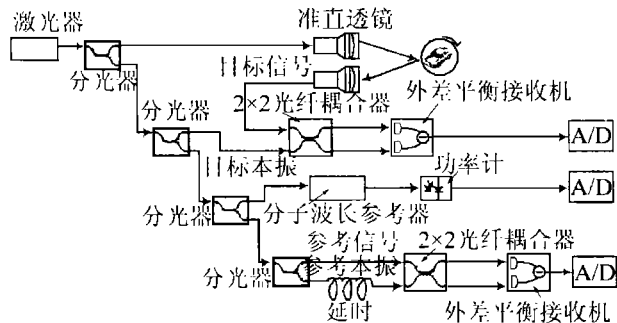


图7 西安电子科技大学的系统框图

发,给出了一个逆合成孔径成像的原理性的室内系

统。首次采用收发镜头分置作为系统的接收单元,有效地克服了光纤或镜头断面带来的干扰,并且以理想的“一步一停”工作模式实现了激光波段的合成孔径成像。理想的旋转目标模型难以实现,目标不可能放置在转台的理想中心,因此,不能简单地通过方位傅里叶变换进行聚焦处理,而是需要经过平动补偿算法,包括包络对齐(对齐由于平动使得每次回波距离向包络的相互错开)和初相校正(校正由于平动造成散射点相位的变化)。经外差处理距离压缩和平动补偿后,转化为理想的转台成像模型,此时图像会出现沿方位向的一些窄亮线,说明距离向压缩和平动补偿的成功,然后进行方位向的傅里叶变换,完成逆合成孔径成像。成像结果如图 8 所示。实验结果表明:试验系

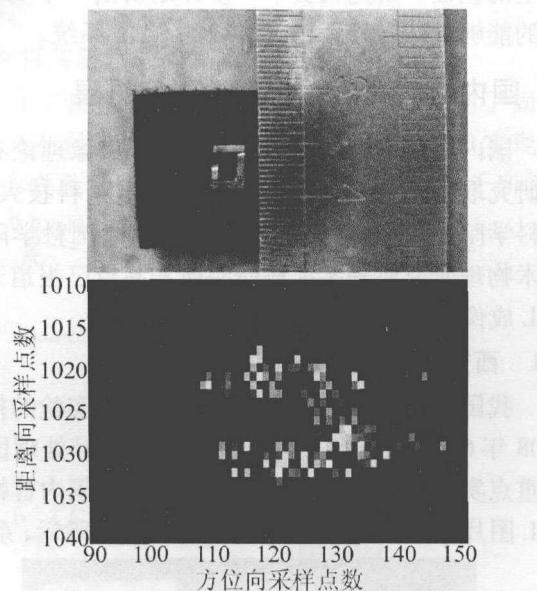


图 8 西安电子科技大学的实验结果

统和数据处理方法是可行性和有效性的。采用的基于参考通道技术的激光信号频率非线性的时域补偿方法,可以有效地补偿由于发射信号近似线性带来的高次相位误差。采用以镜头收发分置的收发系统代替由单镜头加环行器组合的系统,可以有效地消除镜头、光纤连接处等带来的强干扰。

3.2 中国科学院上海光学精密机械研究所的 SAL 实验

2009 年 6 月,中国科学院上海光学精密机械研究所也成功进行了室内合成孔径激光雷达的 2 维成像实验^[9],其特点是按照合成孔径激光雷达光学原理设计了一个缩小尺寸的实验装置,并在短距离的实验平台上模拟远场衍射,实现了点目标的方位向激光合成孔径成像,然后在采用 HCN 光谱吸收盒同步起始光频相位的基础上,实现了点目标的方位向和距离向同时成像。光学外差采用迈克耳逊干涉仪结构,比光纤外差结构更具有通用性。探测到的 2 维分布的光电信号,经过距离向傅里叶变换聚焦和方位向的相位类 2 次项

匹配滤波后,将产生目标字符的实验结果输出图像,图 9 中给出了二值化结果。实验结果表明,本次实验已

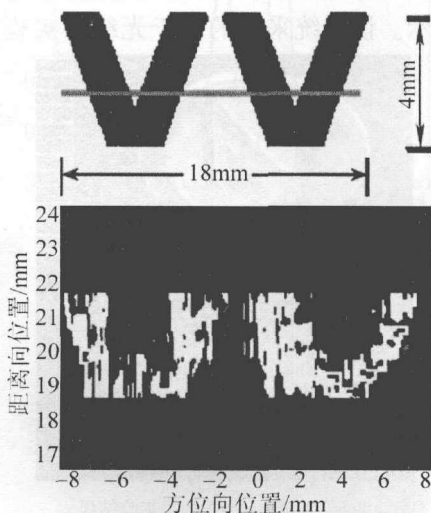


图 9 中国科学院上海光学精密机械研究所的实验结果

经实现了 1 个 2 维图案目标的方位向和距离向同时成像,扫描条带宽度小于 10mm,分辨率约为 1.2mm × 2mm,解决了 SAIL 空间光学、时间光学和图像处理等方面的核心问题,并实现了整个系统的光学、光电子学和图像处理的联通。

4 合成孔径激光雷达的关键技术

就目前的激光技术和合成孔径信号处理技术来看,合成孔径激光雷达要工程实现,还有很长的路要走。

(1) 快速极大带宽信号调制技术的研究。SAL 较 SAR 的主要优势就是可以获得惊人的分辨率,然而极高的距离分辨率需要极大带宽的信号调制技术作保证,极高的方位分辨率需要较高的脉冲重复频率作保证。传统的激光调制技术有电光调制、声光调制和腔内直接调制等几种调制方式,然而这些调制技术都无法满足 SAL 系统的实际需要。

(2) 快速极大带宽信号接收技术的研究。光学接收望远镜的尺度大于波长 3 个 ~ 6 个数量级,其空间接收与微波接收有原理差别。在合成孔径激光成像中,目标的反射回波经过距离衍射到达合成孔径激光雷达光学接收天线时,其随着距离变化相对于光学天线将产生不同的波面像差或者波前形状,通过接收望远镜在光电探测器面上与激光本机振荡器激光光束合成进行外差探测时,波面像差将极大影响外差光电探测效率,甚至导致探测失效。因此,克服回波信号的衍射波面像差保证外差探测,是实现合成孔径激光雷达的关键光学问题。

(3) 高精度的成像算法和运动补偿技术的研究。由于合成孔径激光成像雷达的分辨率非常高,距离向和方位向的耦合非常严重,需要对距离向和方位向进

行去耦合补偿,需要开发相应的适合合成孔径激光雷达的成像算法作为保证;另一方面,合成孔径激光成像雷达采用激光作为信号的载体,激光由于波长非常短,微小的抖动都会对成像产生严重的影响,所以,需要开发高精度的运动补偿算法来保证实际的合成孔径激光雷达成像。

(4)成熟的合成孔径激光雷达系统设计。合成孔径激光雷达以激光作为信号载体,其发射、接收等各系统模块较微波都有很大的变化,如何将这些分系统有机地结合在一起,是合成孔径激光雷达走向工程必须克服的关键技术。

5 小 结

合成孔径激光雷达作为未来主动对地观测的一个重要组成部分,可以大大提高现代化作战的效能,既可装备战斗机和轰炸机,也可以装备监视飞机和无人机;还可用于灾害和环境监测、海洋观测、资源勘察、农作物调查估产、森林调查等民用方面;在军事、科学研究、工业生产中都有广泛的应用前景^[10],但是受限于激光技术,合成孔径激光雷达还有很长的路要走。

参 考 文 献

[1] MARCUS S, COLELLA B D. Solid-state laser synthetic aperture radar

[J]. *Applied Optics*, 1994, 33(6): 960-964.

[2] GREEN T J, MARCUS S, COLELLA B D. Synthetic aperture radar imaging with a solid-state laser[J]. *Applied Optics*, 1995, 34(30): 6941-6949.

[3] BASHKANSKY M, KUCKE R L, FUNK E. Two-dimensional synthetic aperture imaging in the optical domain[J]. *Optics Letters*, 2002, 27(22): 1983-1985.

[4] BECK S M, BUCK J R, BUELL W F, *et al.* Synthetic-aperture imaging laser radar: laboratory demonstration and signal processing[J]. *Applied Optics*, 2005, 44(35): 7621-7629.

[5] ALLEACE G. Northrop Grumman successfully demonstrates synthetic aperture laser radar for tactical imagery [EB/OL]. (2006-9-10) [2010-07-02]. http://www.irconnect.com/noc/press/pages/news_releases.html?d=103583.

[6] BUCK J R, KRAUSE B W, MALM A, *et al.* Synthetic aperture imaging at optical wavelengths[C]//The Conference on Lasers and Electro-Optics/The International Quantum Electronics Conference. Baltimore; Optical Society of America, 2009: 1-2.

[7] YOSHKADO S, ARUGA T. Feasibility study of synthetic aperture infrared laser radar techniques for imaging of static and moving objects [J]. *Applied Optics*, 1998, 37(24): 5631-5639.

[8] XING M D, GUO L, TANG Y, *et al.* Design on the experiment optical system of synthetic aperture imaging lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(2): 290-294 (in Chinese).

[9] ZHOU Y, XU N, LUAN Z, *et al.* 2-D imaging experiment of a 2-D target in a laboratory-scale synthetic aperture imaging lidar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(7): 2030-2032 (in Chinese).

[10] WANG S W, HOU T J, ZHOU D F, *et al.* Synthetic aperture lidar [J]. *Laser Technology*, 2008, 32(1): 4-7 (in Chinese).

(上接第229页)

最好的图像质量,必须对这些参量进行仔细调整,这需要一个稳定的工作环境。当载具运动而无法满足这一条件时,只能考虑实时性和图像质量的平衡,追求一个次优的结果。考虑能量探测极限和景深的协调从而把镜头参量固定下来,再依据水下激光脉冲展宽原理实现变步长的序列成像,完成对前方空间的成像搜索,该方法为距离选通技术的实用化发展提供了一种尝试。

参 考 文 献

[1] FU B, YANG K Ch, RAO J H, *et al.* Analysis of MCP gain selection for underwater range-gated imaging applications based on ICCD [J]. *Journal of Modern Optics*, 2010, 57(5): 408-417.

[2] STRAND M P. Imaging model for underwater range-gated imaging systems [J]. *Proceedings of SPIE*, 1991, 1537: 151-160.

[3] XU X W, GUO J, YU Q Y, *et al.* Key technique of laser range gated imaging [J]. *Laser Technology*, 2003, 27(6): 603-605 (in Chinese).

[4] FOURIER G R, BONNIER D, FORAND J L. Underwater laser imaging system with large field-of-view [J]. *Proceedings of SPIE*, 1994, 2258: 413-421.

[5] SWARTA B A. Laser range gate underwater imaging advances [J]. *Proceedings of IEEE Oceans '94*, 1994, 2: 722-727.

[6] SUN J, ZHANG X H, GE W L, *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).

[7] FOURNIER G R, BONNIER D, FORAND J L, *et al.* Range-gated underwater laser imaging system [J]. *Optical Engineering*, 1993, 32(9): 2185-2190.

[8] DUSSAULT D, HOESS P. Noise performance comparison of ICCD with CCD and EMCCD cameras [J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5563: 195-204.

[9] YU D Y, TAN H Y. *Engineering optics* [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 1999: 58-63 (in Chinese).

[10] ZHOU Y M, LIU Q Zh, ZHANG X H, *et al.* An efficient method for simulating time-domain broadening of laser pulse propagating underwater [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(1): 143-147 (in Chinese).

[11] MOBLEY C D, SUNDMAN L K, BOSS E. Phase function effects on oceanic light field [J]. *Applied Optics*, 2002, 41(6): 1035-1050.