

引用格式: SHEN Zhen-min, SHANG Wei-dong, WANG Bing-jie, *et al.* Lidar with High Scattering Ratio Suppression for Underwater Detection[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(6):0601001

沈振民,尚卫东,王冰洁,等. 高散射抑制比激光雷达水下探测技术探析[J].光子学报,2020,49(6):0601001

高散射抑制比激光雷达水下探测技术探析

沈振民^{1,2},尚卫东^{1,2},王冰洁³,赵彤³,张海洋⁴,郑永超^{1,2},周国清⁵

(1 北京空间机电研究所,北京 100094)

(2 中国空间技术研究院 空间激光信息感知技术核心专业实验室,北京 100094)

(3 太原理工大学 光电工程研究所,太原 030024)

(4 北京理工大学 光电学院,北京 100081)

(5 桂林理工大学 广西空间信息与测绘重点实验室,广西 桂林 541004)

摘要:浅海海水严重的后向散射是阻碍激光近海水下探测应用的关键问题,回波信号中的后向散射制约了水下目标探测深度、分辨率和对比度.针对该问题,研究了两种高散射抑制比海洋激光雷达——混沌脉冲激光雷达和相干双频脉冲激光雷达,这两种激光雷达信号具有内在的高频强度调制特性,而后向散射具有低频特性.因此,在目标信号光和后向散射光同量级条件下,可通过带通或高通滤波将海水后向散射滤除,从而提高系统信噪比.

关键词:激光雷达;水下探测;强度调制;混沌激光;后向散射

中图分类号:TN249

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20204906.0601001

Lidar with High Scattering Ratio Suppression for Underwater Detection

SHEN Zhen-min^{1,2}, SHANG Wei-dong^{1,2}, WANG Bing-jie³, ZHAO Tong³, ZHANG Hai-yang⁴,
ZHENG Yong-chao^{1,2}, ZHOU Guo-qing⁵

(1 Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China)

(2 Key Laboratory for Space Laser Information Perception Technology, China Academy of Space Technology,
Beijing 10094, China)

(3 Institute of Optoelectronic Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

(4 School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

(5 Guangxi Key Laboratory of Spatial Information and Geomatics, Guilin University of Technology, Guilin,
Guangxi 541004, China)

Abstract: The severe backscattering of the shallow seawater hinders the application of laser detection in the offshore. The backscattering of the echo signal restricts the depth, resolution and contrast of underwater target detection. Two novel ocean lidar with high scattering suppression ratio, chaotic lidar and coherent dual frequency lidar, are studied. The two kinds of lidar signal owns the inherent intensity modulation characteristics, and then the backscattering owns the low frequency characteristics. Therefore, the backscattering of seawater can be removed by the band-pass or high pass filtering when the intensity of the object signal and the backscattering light are the approximate same magnitude, so as to improve the signal-to-noise ratio of the ocean lidar system.

Key words: Laser radar; Underwater detection; Intensity modulation; Chaotic laser; Backscattering

OCIS Codes: 010.3640;010.4450;010.4458

基金项目:国家自然科学基金(Nos.61705007, 61705160),广西创新驱动发展专项(No.Guik AA 18118038)

第一作者:沈振民(1983-),男,高级工程师,博士,主要研究方向为激光水下探测技术. Email: szm@bit.edu.cn

收稿日期:2020-01-19;录用日期:2020-04-24

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

激光雷达技术作为水下非声探测的一种主流技术,具有方向性强、分辨率高、探测效率高等特点,并与机载平台速度快的优势相结合,使得机载激光雷达成为非声探测技术中最为有效的全覆盖探水系统,还能够探测到船舶无法探测的水域(如暗礁、岛礁等)^[1-5].但水下信道的复杂性给激光雷达水下探测带来了严峻的挑战,尤其是水及水中颗粒物对光的吸收和散射,大大降低了激光测程和成像对比度.水对蓝绿光波段的光波吸收最小,该波段在水中的穿透能力最强,因此采用蓝绿激光器用于水下探测.在以吸收为主(散射较弱)的水体环境中,可通过提高激光发射功率来增加光波在水中的传输距离;而在以散射为主(吸收较弱)的水体环境中,仅通过提高发射功率并不能改善系统性能,因为在返回的目标信号强度增加的同时,返回的散射光强度也同时增加,并不能从散射光中识别出目标信号^[6-8].

脉冲/距离门调制技术已被用于解决改善在浑浊水域的探测、测距和成像问题.但该技术使用的前提是要知道被测目标的大致距离,且门内的后向散射依然存在^[9,10].MULLEN L 等于 1995 年首先提出了一种将微波雷达和激光雷达相结合的新型混合雷达(Hybrid Lidar-radar, HLR)技术.HLR 技术使用高频强度调制的光载波来滤除后向散射,进而改善提高系统性能,因为当调制频率在 100 MHz 以上时,后向散射的调制开始去相关,即后向散射在高频段(>100 MHz)失去调制信息^[11-14].2012 年美国海军航空系统司令部(Naval Air Systems Command, NASC)的研究人员研究了一项新的脉冲调制技术,结合了上述两种方法^[15].PELLEN F 等也对此概念作了简要阐述,该技术既使用了短脉冲距离选通技术(时间区分/接收器门控),也使用了强度调制技术(频率辨别)来对目标和后向散射来进行区分辨别^[16].

本文提出的基于内部强度调制技术的相干双频脉冲激光雷达和混沌脉冲激光雷达,无需外部加入射频信号源对光波调制,其自身具有强度调制的能力,具有调制深度大、距离分辨率高、抗干扰能力强的优势.

1 基于内部强度调制的激光雷达

1.1 后向散射频率特性

激光在水中传输,遇到水中目标返回到某点的激光功率,在时域上可看成是入射激光与水的脉冲响应的卷积,可表示为

$$P_{dL}(t) = P(t) \otimes H_{dL}(t) \quad (1)$$

式中, $P_{dL}(t)$ 是某点 p_d 处接收到的返回激光雷达信号, L 是点 p_d 到目标的距离; $P(t)$ 是激光发射功率, $H_{dL}(t)$ 是水的脉冲响应; \otimes 为卷积运算.

水的脉冲响应包含两部分:后向散射部分 H_i 和目标部分 H_t

$$H_{dL}(t) = H_i(t) \otimes H_t(t) \quad (2)$$

式(2)经傅立叶变换,水的频率响应可表示为^[17]

$$H_{dL}(f) = H_i(f) + H_t(f) = \left(\frac{\eta F A_r}{R^2} \right) \cdot \left[\rho \frac{1 - e^{-2\alpha v t_d} e^{j4\pi f t_d}}{\alpha v - j2\pi f} + \rho_t e^{-2\alpha v t_t} e^{j4\pi f t_t} \right] \quad (3)$$

式中, $H_i(f)$ 为来自水体的持续后向散射部分的频域分量; $H_t(f)$ 为来自目标部分的频域分量; η 为发射和接收系统的总光学效率; F 是有限视场; A_r 是有效接收口径面积; R 是探测距离; ρ 是海水的散射率(认为海水是均匀介质); α 是海水的衰减系数; ρ_t 是目标反射率; v 是光在海水中的速率; t_d 为光子达到水下目标的时间; t_t 为单程返回时间.

根据式(3)和表1中参数,可得如图1所示的后向散射和目标的幅频曲线.可以看出,不同频率处的目标信号的幅频响应不变;而后向散射幅频响应随频率的增加,幅值指数衰减,这说明后向散射的能量主要集中在低频区域.如果将激光经高频强度调制后发射,在海水中传输经目标返回后的目标信号仍然具有高频特性,而后向散射信号在传输过程中高频成分丢失,大部分能量集中在低频成分.因此,可通过高通或带通滤波将具有低频特性的后向散射滤除,从而提高系统的信噪比.

由图1可知,海水后向散射信号主要存在于低频区域,随着频率的增加,幅值呈指数式衰减.当频率大于某个特定值后响应曲线幅度迅速减小,该频率称为海水后向散射信号的截止频率,有 $f_c = \alpha v / 2\pi$.可以看出,该截止频率取决于海水的衰减系数及海水折射率,随着衰减系数的增加,截止频率也增大,如图2.

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

Total optical efficiency (η)	Receiving field of view (F)	Aperture (D)	Refractive index of seawater (n)	Target distance (L)	Target reflectivity (ρ_t)	Attenuation coefficient (α)	Light speed in vacuum (c)	Aircraft altitude (H)	Scattering rate (ρ)
0.36	50 mrad	0.2 m	1.34	50 m	0.1	0.17 m^{-1}	$3 \times 10^8 \text{ m/s}$	1 000 m	0.6

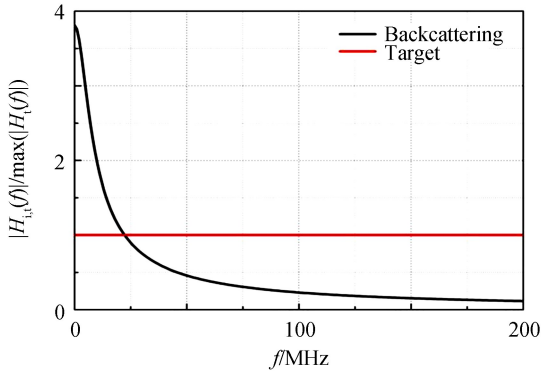


图 1 激光雷达回波信号幅频响应曲线

Fig.1 Frequency response of laser echo signal

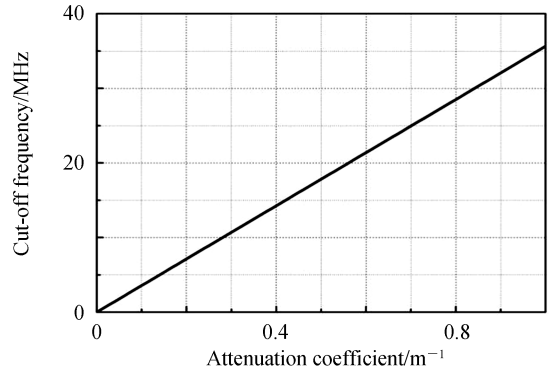


图 2 截止频率与海水衰减系数的关系

Fig.2 The relationship between cutoff frequency and attenuation coefficient of seawater

激光经高频强度调制后,返回目标信号和后向散射信号能量在一个数量级时,采用高通或带通滤波可达到抑制海水后向散射的效果.如果后向散射能量远小于目标信号能量,无需进行滤波;如果后向散射远大于目标信号能量,淹没了目标信号,则需采用更高频率的调制激光($>1 \text{ GHz}$)进行高通滤波.

1.2 相干双频脉冲激光雷达

两个双频激光脉冲,频率分别为 ν_1 和 ν_2 ,其频率差在射频段,光场可分别表示为

$$E_1(\nu_1) = A_1 \cos(2\pi\nu_1 t + \phi_1) \quad (4)$$

$$E_2(\nu_2) = A_2 \cos(2\pi\nu_2 t + \phi_2) \quad (5)$$

式中, A 和 ϕ 为两光波的振幅和相位,当激光直接入射到光电探测器上时,输出的光电流表示为^[18]

$$i(t) = [E_1(\nu_1) + E_2(\nu_2)]^2 = A_1^2 \cos^2(2\pi\nu_1 t + \phi_1) + A_2^2 \cos^2(2\pi\nu_2 t + \phi_2) + 2A_1 A_2 \cos[2\pi(\nu_1 - \nu_2)t + (\phi_1 - \phi_2)] + 2A_1 A_2 \cos[2\pi(\nu_1 + \nu_2)t + (\phi_1 + \phi_2)] \quad (6)$$

式中,光电探测器对光频项无法响应,只能对第三项射频频项响应,产生拍频电信号,其信号形状如图 3.

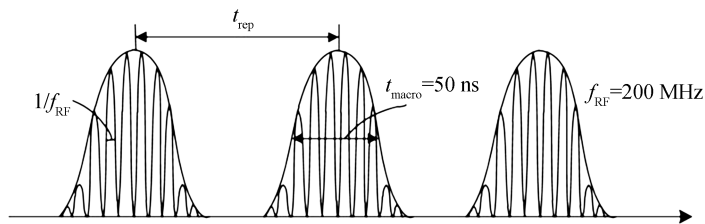


图 3 脉冲调制时域波形图

Fig.3 Time domain waveform of modulating pulse

频差在射频段的相干双频激光,其频率差可在 $10^8 \sim 10^9 \text{ Hz}$ 量级,这相当于一个激光脉冲被高频调制,其调制频率在射频段,调制后的波形如图 5,相当于一个巨脉冲被调制成许多强度起伏的微脉冲,调制后微脉冲的脉宽等于双频激光频差的倒数,即双频激光射频频差越大,微脉冲脉宽越窄.此种相干双频激光可看成是基于脉冲内部强度调制技术,无需在外部加入射频频调制源,其调制深度更深.根据 1.1 节的分析,相干双频激光具有高频强度调制特性,因此通过高通或带通滤波可滤除海水大部分的后向散射.

激光器采用双频注入锁定的方式,对种子源采用声光移频再合束的方式产生双频:窄线宽光纤激光器输出的光经光纤耦合器分成两束,其中一束光经过声光调制器进行频移,设声光调制器的中心频率为 f .移频后的光与另一束光由另一个光纤耦合器合成一束,载有频差为 f 的双频激光束通过起偏器,再以布鲁斯特

角入射到从动激光器作为双频注入锁定的种子源.从动激光器采用半导体激光泵浦电光调 Q 机制.腔长由压电陶瓷微调,以满足注入锁定的谐振条件,注入的过程如下:压电陶瓷的电压进行扫描,光电探测器探测到谐振信号后,说明一个纵模已经与双频信号中的一个频率锁定,这是压电陶瓷上的电压保持.然后对声光调制器的频率进行扫描,寻找另一个谐振条件,另一个频率应锁定在相邻的另一个纵模上.同时观测输出脉冲,当输出脉冲含有 f 调制频率的调制信号时,即说明两个频率分别锁定到相邻的两个纵模上.此方案的前提是精确设计腔长,使相邻纵模间隔为 f .从动激光器输出调制脉冲再注入激光放大器中进行能量放大,放大后经过腔外非线性倍频过程,实现 532 nm 调制脉冲绿光输出.注入锁定双频激光器如图 4.

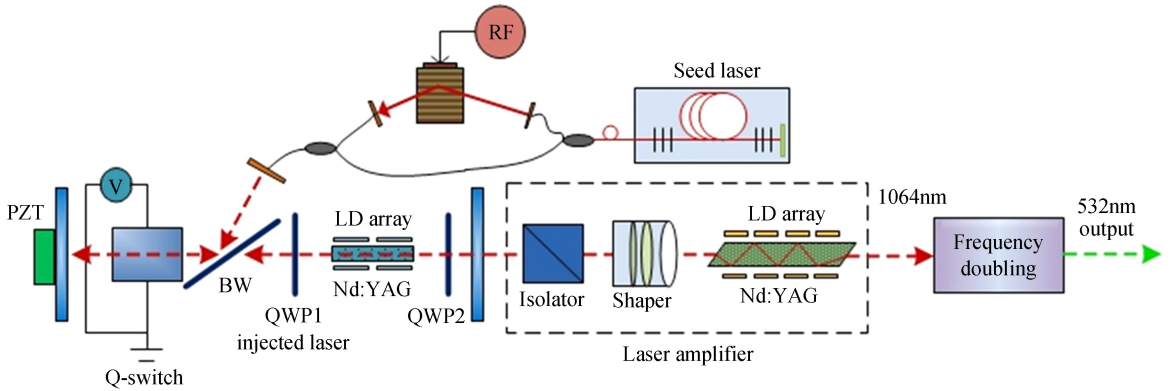


图 4 双频注入锁定及倍频系统

Fig.4 Dual frequency injection locking and frequency doubling system

1.3 混沌脉冲激光雷达

混沌信号是确定性系统产生的类噪声信号,拥有良好的自相关、互相关特性.作为雷达波形,宽带混沌信号具有图钉型模糊函数、良好的距离、速度分辨力和低截获概率,所以宽带混沌信号是雷达应用的一种理想的信号^[19, 20].图5(b)和(d)分别为混沌激光的功率谱密度和自相关曲线,由维纳-辛钦定理可知,自相关函数

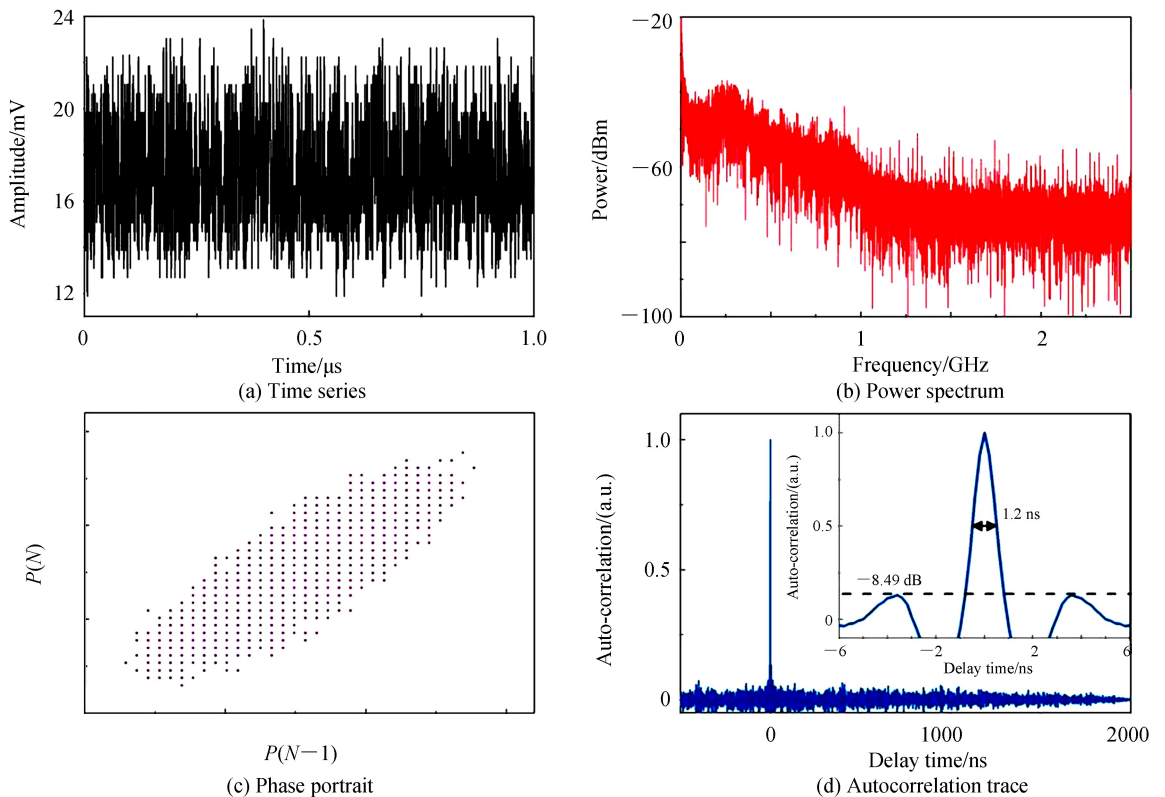


图 5 混沌激光输出时域、频域、相图和自相关曲线

Fig.5 Time series, power spectrum, phase portrait and autocorrelation trace of chaotic laser output

和功率谱是一对傅里叶变换对,因此,混沌激光的信号带宽越宽,所对应的自相关曲线越窄,从而测距精度越高.图 5(d)的自相关曲线宽度在 ns 量级,其测距精度能够达到 cm 量级.

混沌激光在频率域上具有宽带特性,其带宽可达吉赫兹甚至几十吉赫兹量级,如此宽的带宽使目标信号在高频区域也具有较高的能量,再通过高通或带通滤波将具有低频特性的后向散射滤除,则可将目标信号提取出来.

对于混沌激光水下探测,连续混沌激光功率有限,在水中传输距离较短,因此,设想利用混沌脉冲激光进行水下探测,单脉冲的峰值功率远大于连续激光的平均功率,可大大增加混沌激光水下传输距离.

BAER T 教授在研究中指出,Nd:YAG 固体混沌激光器在多纵模耦合倍频时,可产生幅度随机振荡的混沌现象,如图 6;美国卓治亚大学的 ROY R 等用正反馈技术在 Nd:YAG 激光器腔内倍频实现了小周期微扰法的光学混沌控制并建立了理论模型;随后还有多个研究小组利用正弦泵浦调制和损耗调制的方法进行了固体激光器混沌产生的研究^[21-24].

与单脉冲测距相比,混沌脉冲激光水下探测需要采用一串脉冲进行互相关运算,从而获取目标的距离信息.因此,针对互相关数据点个数与互相关曲线的噪声水平的关系进行了初步研究.这里定义噪声水平为互相关曲线次峰与主峰强度的比值.图 7 为使用不同数据点相关后相关曲线的噪声水平,随着数据点的增加,噪声水平逐渐下降,当数据点数为 50 时,其噪声水平也可达 0.33.一般来说,噪声水平小于 0.5 即可从噪声中识别出信号.

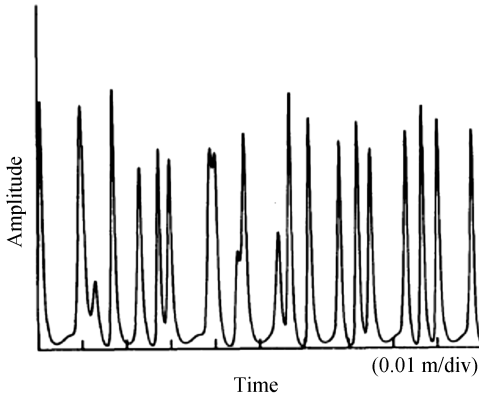


图 6 固体激光器双模和三模耦合情况下产生的混沌现象

Fig.6 Chaos generated by two mode and three mode coupling in solid lasers

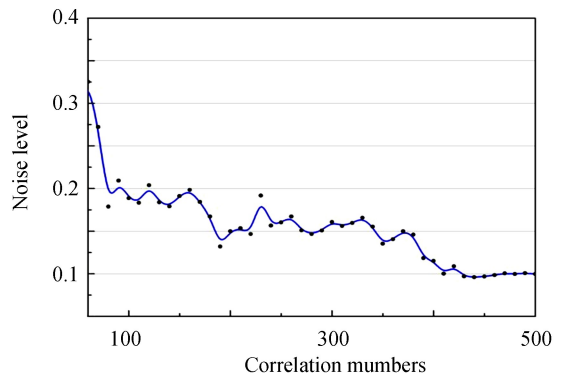
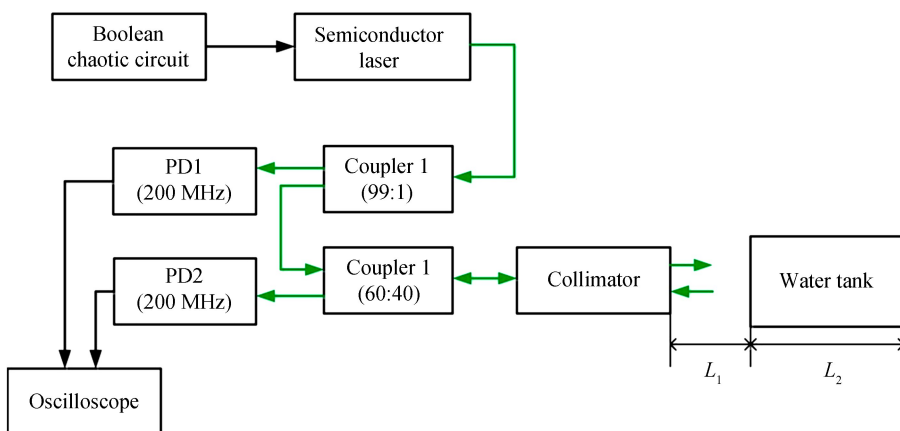


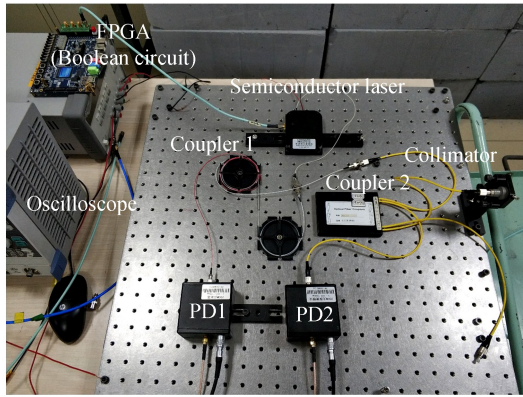
图 7 相关计算点数与 PNL 的关系曲线

Fig.7 The relation between the number of relevant calculation points and PNL

针对混沌激光水下探测进行了初步的实验,采用布尔混沌电路调制半导体激光器产生连续混沌激光,输出平均功率为 0.13 mW,带宽为 200 MHz,实验装置如图 8.



(a) Schematic diagram of experimental device



(b) Physical drawing of experimental device

图 8 实验装置

Fig.8 Experimental device

耦合镜到水槽前端距离 $L_1 = 94.0$ cm, 实验中将反射镜放入水槽内, 反射镜距水槽前端距离为 $L_2 = 51.0$ cm. 将水槽内加入清水后进行距离测量; 然后在清水内加入颗粒粉末, 再次进行距离测量. 使用浊度计测量清水和加入粉末的水的浊度分别为 0.55 NTU、6.77 NTU. 其测距互相关曲线分别如图 11 和图 12. 在清水情况下, 由图 9(b)可得到 $L_1 + L_2 = 4.155$ m - 2.490 m = 1.665 m, 则 $L_2 = (1.665 - 0.940)$ m / 1.33 = 54.5 cm (清水的折射率按 1.33 计算), 与实际值 51.0 cm 相比, 误差为 3.5 cm. 加入粉末后, 由图 10(b)可得到 $L_1 + L_2 = 4.170$ m - 2.439 m = 1.731 m, 则 $L_2 = (1.731 - 0.940)$ m / 1.34 = 59.0 cm (浊水折射率按 1.34 计算), 则误差为 8.0 cm.

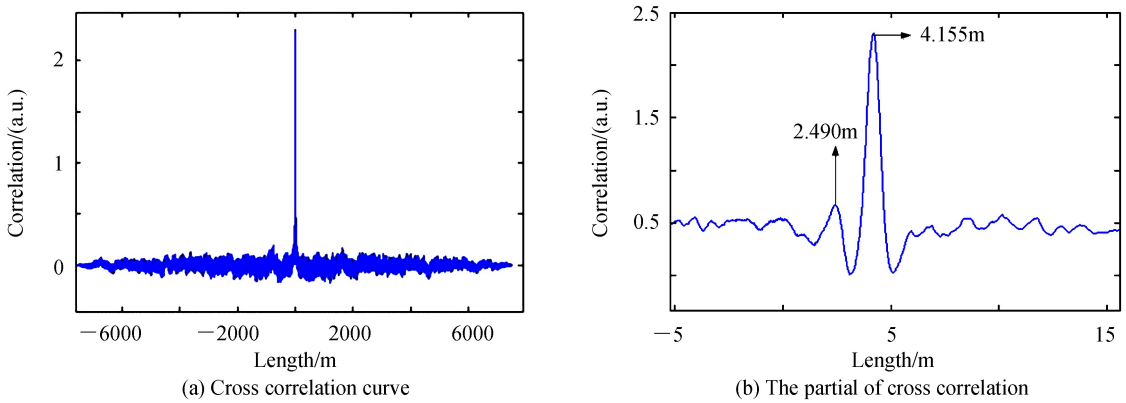


图 9 浊度为 0.55NTU 的清水的测距互相关曲线

Fig.9 The ranging cross-correlation curve of clear water with turbidity of 0.55 NTU

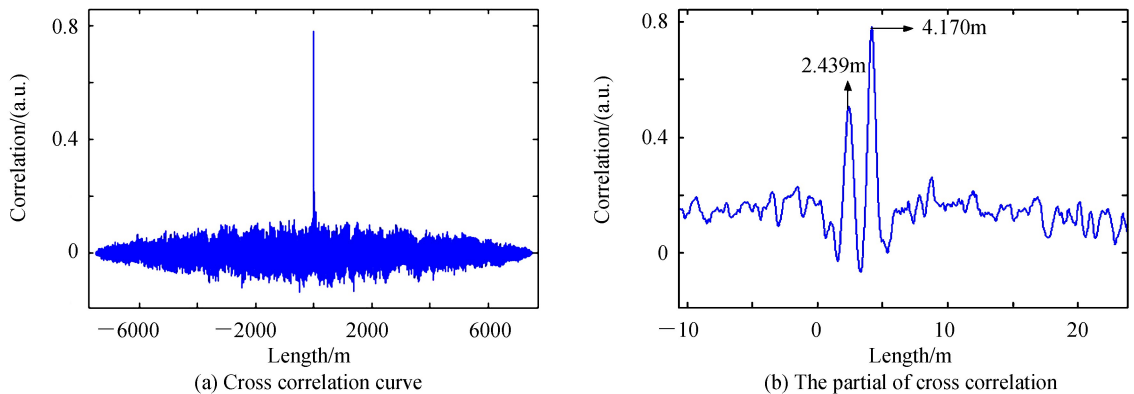


图 10 浊度为 6.77 NTU 的加入粉末后的测距互相关曲线

Fig.10 The ranging cross-correlation curve of clear water with turbidity of 6.77 NTU

从图 9(a)和图 10(a)可以看出,加入粉末后水体浊度增加导致互相关曲线旁瓣噪声增大,这主要是由后向散射引起.将互相关曲线展开后,如图 9(b)和 10(b)所示,可看出有两个峰值,次峰为准直镜端面反射引起,即次峰值距离零点的距离为激光器至出射准直镜端面的距离.主峰值则为目标反射镜的距离.比较图 9和图 10,加入粉末后的主峰峰值明显小于未加入粉末的主峰峰值,而次峰峰值则基本相同,这说明加入粉末后水体的吸收和散射明显增加,但混沌激光仍可识别出目标信号.加入清水情况下,测距误差为 3.5 cm;加入粉末情况下,测距误差为 8 cm 左右.浊水相比于清水,测距误差明显增加,这是由于水体后向散射增加,混沌激光宽度展宽,互相关峰宽展相应变宽,从而导致测距误差增加.由于实验条件有限,激光功率较小,测距距离有限,后续实验将采取混沌脉冲激光测距方式,以验证混沌脉冲激光测距的可行性.

2 结论

本文讨论了高散射抑制比激光雷达用于水下探测的可能性,主要论述了两种基于内部强度调制技术的激光雷达:相干双频脉冲激光雷达和混沌脉冲激光雷达,二者均有抑制海水后向散射的潜能.对于混沌激光雷达开展了初步的水下探测实验.在清水和浊度较大的水体中,混沌激光可较容易从相关峰中提取目标信息,混沌激光雷达具有抑制海水后向散射的能力.从相关峰噪声上可以看出,激光在浊水中比在清水中产生了更强的后向散射;从相关峰强度上可以看出,激光在浊水中衰减更为严重,由于浊水中后向散射强度增加,信号时域展宽,带宽变窄,测距误差增加.由于实验条件有限,所采用的混沌光纤激光源功率仅有毫瓦量级,布尔混沌电路调制带宽仅有 200 MHz.后续工作将采用半导体激光器光反馈方式研制百毫瓦平均功率、吉赫兹高带宽的混沌脉冲激光源,验证远距离水下传输高带宽混沌脉冲激光具备更强抑制海水后向散射的能力.

参考文献

- [1] TUELL G, BARBOR K, WOZENCRAFT J. Overview of the coastal zone mapping and imaging lidar (CZMIL): a new multisensor airborne mapping system for the U.S. Army Corps of Engineers [C]. SPIE, 2010, **7695**: 76950R.
- [2] JENNIFER M W. Requirements for the coastal zone mapping and imaging lidar (CZMIL) [C]. SPIE, 2010, **7695**: 76950Q.
- [3] FEYGELS V, RAMNATH V, SMITH B, *et al.* Meeting the international hydrographic organization requirements for bottom feature detection using the coastal zone mapping and imaging lidar (CZMIL) [J]. IEEE, 2016, 1-6.
- [4] LAUX A, MULLEN L, PEREZ P, *et al.* Underwater laser range finder [C]. SPIE, 2012.
- [5] COCHENOUR B, MULLEN L, MUTH J. A modulated pulse laser for underwater detection, ranging, imaging, and communications [C]. SPIE, 2012.
- [6] MOBLEY C D. Light and water: Radiative transfer in natural waters[M]. Academic Press San Diego, 1994.
- [7] GORDON H R. Interpretation of airborne oceanic lidar: effects of multiple scattering [J]. *Applied Optics*, 1982, **21** (16): 2996-3000.
- [8] MULLEN L, COCHENOUR B, RABINOVICH W, *et al.* Backscatter suppression for underwater modulating retroreflector links using polarization discrimination [J]. *Applied Optics*, 2009, **48**(2): 328-337.
- [9] FOURNIER G R, BONNIER D, FORAND J L, *et al.* Range-gated underwater laser imaging system [J]. *Optical Engineering*, 1993, **32**, 2185-2190.
- [10] ZHANG D Y, LI S N, LU W, *et al.* Experimental research on range gating laser imaging radar [C]. SPIE, 2015, **9674**: 967418.
- [11] MULLEN L, COCHENOUR B, RABINOVICH W, *et al.* Backscatter suppression for underwater modulating retroreflector links using polarization discrimination [J]. *Applied Optics*, 2009, **48**(2): 328-337.
- [12] MULLEN L, CONTARINO V. Hybrid LIDAR-radar: seeing through the scatter [J]. *Microwave Magazine*, IEEE, 2000, **1**(3): 42-48.
- [13] MULLEN L, LAUX A, COCHENOUR B, *et al.* Demodulation techniques for the amplitude modulated laser imager [J]. *Applied Optics*, 2007, **46**(30): 7374-7383.
- [14] MULLEN L, VIEIRA A, HERZFELD P, *et al.* Application of RADAR technology to aerial LIDAR systems for enhancement of shallow underwater target detection [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1995, **43**: 2370-2377.
- [15] COCHENOUR B, MULLEN L, MUTH J. H, *et al.* A modulated pulse laser for underwater detection, ranging, imaging, and communications [C]. 2012, SPIE, **8372**: 83720S.
- [16] PELLEN F, JEZEQUEL V, ZION G, *et al.* Detection of an underwater target through modulated lidar experiments at grazing incidence in a deep wave basin [J]. *Applied Optics*, 2012, **51**(30): 7690-7700.
- [17] MA Yong, JI Hang, LIANG Kun, *et al.* Application of modulated lidar on optical carrier for ocean exploration [J].

- Laser Technology*, 2008, **32**(4): 346-349.
- 马泳, 冀航, 梁琨, 等. 载波调制激光雷达技术在海洋探测中的应用[J]. 激光技术, 2008, **32**(4): 346-349.
- [18] LI Lei, ZHAO Chang-ming, GAO Lan, *et al.* Laser detection by electronic instead of optical using two frequency laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2): 249-252.
- 李磊, 赵长明, 高岚, 等. 变光外差为电外差的双频激光探测[J]. 光学学报, 2007, **27**(2): 249-252.
- [19] WANG Yun-cai, GONG Tian-an. Research progress of chaotic optical communication and chaotic laser ranging [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2009, **7**(1): 1-6.
- 王云才, 龚天安. 混沌光通信与混沌激光测距的研究进展[J]. 光学与光电技术, 2009, **7**(1): 1-6.
- [20] WANG Yun-cai, ZHANG Jian-guo, XU Hang, *et al.* Optical time domain reflectometer based on the chaotic signal [J]. *Optical Instruments*, 2014, **36**(5): 449-454.
- 王云才, 张建国, 徐航, 等. 基于混沌信号的光时域反射仪[J]. 光学仪器, 2014, **36**(5): 449-454.
- [21] BEAR T. Large-amplitude fluctuations due to longitudinal mode coupling in diode-pumped intracavity-doubled Nd: YAG lasers [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 1986, **3**(9): 1175-1180.
- [22] ROY R, MURPHY T W, MAIER T D, *et al.* Dynamical control of a chaotic laser: experimental stabilization of a globally coupled system [J]. *Physical Review Letters*, 1992, **68**(9): 1259-1262.
- [23] ROY R, THORNBURG K S. Experimental synchronization of chaotic lasers [J]. *Physical Review Letters*, 1994, **72**(13): 2009-2014.
- [24] COLET P, ROY R. Digital communication with synchronized chaotic lasers [J]. *Optics Letters*, 1994, **19**(24): 2056-2058.