光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022050301

布尔混沌调制激光雷达水下目标成像实验研究

张鹏程，王冰洁*，徐　航，刘　丽，李静霞

（太原理工大学 新型传感器与智能控制教育部重点实验室，太原 030024）

摘　要： 在激光雷达的水下目标探测中，浑浊水体中悬浮颗粒对激光的吸收和散射作用，使得激光在水中的传输严重衰减。尤其是后向散射所造成的噪声会降低目标对比度甚至淹没信号回波。载波调制技术可以有效抑制后向散射，提高目标回波信号的信噪比。文章将布尔混沌信号作为载波调制信号，基于其内禀高频强度调制特性，构建了布尔混沌调制激光雷达水下成像系统，并在实验室水箱环境下，对衰减系数不同的浑浊水体中的目标物体进行了三维成像实验研究，对比了不同水质中的目标物体三维成像效果。

关键词： 激光雷达；布尔混沌；载波调制；水下目标；三维成像

中图分类号： TP212；TN249　**文章编号：** 1001－5868(2022)05－0999－06

Experimental Study on Underwater Target Imaging of Boolean Chaos Modulated LiDAR

ZHANG Pengcheng，WANG Bingjie，XU Hang，LIU Li，LI Jingxia

（Key Lab. of Advanced Transducers and Intelligent Control System of Ministry of Education and Shanxi Province，Taiyuan University of Technology，Taiyuan 030024，CHN）

Abstract： In the underwater target detection of LiDAR，the underwater transmission of laser is seriously attenuated due to the absorption and scattering of laser by suspended particles in turbid water，especially the noise caused by backscattering will reduce the target contrast and even drown the target echo signal. The carrier modulation technology can effectively suppress backscattering and increase the signal-to-noise ratio of target echo signal. In this paper，the Boolean chaotic signal was used as the carrier modulation signal. Based on its inherent high-frequency intensity modulation characteristics，an underwater imaging system of Boolean chaotic modulation LiDAR was constructed. The three-dimensional imaging experiments of target objects in turbid water with different attenuation coefficients were carried out in the laboratory water tank environment，and the three-dimensional imaging effects of the target in different water quality were compared.

Key words： LiDAR；Boolean chaos；carrier modulation；underwater target；3D imaging

0　引言

激光雷达具有方向性强、分辨率高、探测效率高等特点，在水下目标搜寻、近海地形测绘、海洋资源勘探等领域发挥着越来越重要的作用[1-3]。但是复杂的水体环境，特别是水体及水中颗粒物对光的吸收和散射，给激光雷达水下探测带来严峻挑战。吸收会引起探测信号衰减，限制探测距离；散射除了引起信号衰减外，还会产生强噪声，尤其是后向散射所引起的噪声会降低目标对比度，甚至淹没目标回波。蓝绿光波段是水体的透光窗口，选择蓝绿光作为工作波长可以有效减少水体对探测光的吸收[4]。如何抑制后向散射噪声，提高目标回波信号信噪比则成为激光雷达水下目标探测需要解决的关键问题。

收稿日期：2022－05－03.

基金项目：山西省自然科学基金项目（20210302123194，20210302123187）.

* **通信作者：**王冰洁

E-mail： wangbingjie@tyut.edu.cn

依据后向散射信号和目标反射信号分别在空间传输、偏振态和时域特性上的差异，研究者们已经先后提出利用时间门控[5-7]、空间滤波[8]、偏振光检测[9-10]等方法抑制后向散射噪声。近年来，通过对海水信道的频域特性分析[11]，发现海水的后向散射呈现低通频率响应特性，而目标反射回波呈现全通频率响应特性，如果利用高频载波对发射激光信号进行强度调制，调制频率远大于海水后向散射频域相应的截止频率，则可以将目标信号与后向散射杂波区分开，提高目标回波对比度。据此提出的载波调制技术[12]成为抑制水体后向散射的一种重要方法。研究者们先后进行了单频调制[13]、双频调制[14]、多频调制[15-16]、伪随机码调制[17]等多种调制信号作为激光雷达水下目标探测信号，抑制水体后向散射杂波的研究，验证了载波调制激光雷达技术的有效性。

选择合适的调制波形，可以抑制后向散射的同时，进一步改善探测性能。2004 年，文献[18]首次提出混沌激光雷达的概念，证实混沌激光频域上的宽带特性可实现目标距离的高分辨率测量，时域上的非周期随机性和不可预测性具有天然的抗干扰属性。2013 年，Rumbaugh 等[19]首次提出将混沌激光信号应用于水下目标测距，证实了混沌激光固有的高频特性，在浑浊水体中具有抑制水体后向散射的能力。2020 年，文献[20]报道了利用光反馈半导体激光器产生混沌激光，实验实现了洁净水质环境下目标测距和成像。

本文采用混沌信号调制方案，利用布尔混沌信号对 520 nm 激光进行强度调制，获得混沌绿光信号作为水下目标探测信号，搭建水下目标成像系统，在实验室水箱环境中对浑浊水体中的目标三维成像进行了实验研究。

1 实验系统与探测原理

布尔混沌调制激光雷达水下目标成像实验系统如图 1 所示。混沌激光探测信号由布尔混沌信号发生器直接调制 520 nm 绿光半导体激光器产生。经发射光学系统整形后的混沌激光探测信号被分束镜分为两路：一路作为参考信号，直接进入光电探测器 1；另一路作为探测信号经由二维扫描镜发射到水箱中。水中目标反射的回波信号进入接收光学系统后聚焦到光电探测器 2。实验中所用光电探测器带宽为 1.2 GHz。光电探测器 1 和 2 将参考光信号和回波光信号转化为电信号，由带宽为 2 GHz、采样率设置为 10 GSa/s 的实时示波器采集。实验系统利用 LabVIEW 开发上位机，对雷达系统进行控制。利用上位机控制扫描镜对空间中的目标进行二维扫描，得到目标不同像素点位置处的距离信息和强度信息，实现对空间目标的三维扫描成像。

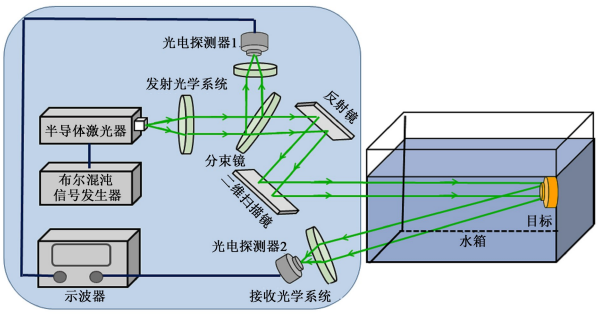
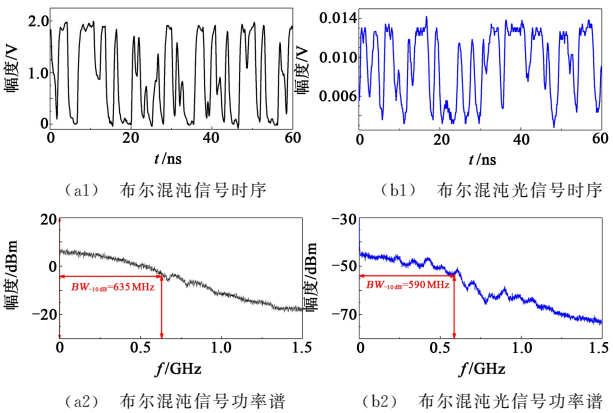


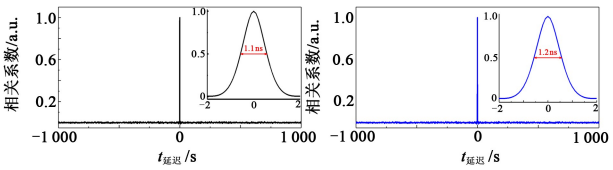
图 1 布尔混沌调制激光雷达水下目标成像实验系统

实验系统中使用的布尔混沌信号发生器由现场可编程阵列(FPGA)编程实现。布尔混沌振荡器是基于自治布尔网络结构实现的。网络中含有 7 个可执行逻辑运算的节点构成具有双向耦合关系的环状拓扑结构。每个节点表示一个具有三输入三输出功能的逻辑门，执行异或或者异或非操作。逻辑门的非理想特性是产生布尔混沌的诱因。详细的设计原理、结构和电路特性分析见参考文献[21]。实验产生的布尔混沌信号时序、功率谱和自相关特性如图 2(a1)～(a3)所示。其信号带宽为 635 MHz，相应的相关曲线的半高全宽(FHWM)为 1.1 ns。调制半导体激光器以后产生的布尔混沌激光探测信号时频特性如图 2(b1)～(b3)所示。对比分析可见，调制激光器后产生的光信号从时序上仍然保持了布尔混沌的随机特性，功率谱和自相关曲线也保持了良好的宽谱特性和 δ 线型自相关性。由于实验系统中采用的调制器带宽为600MHz，所以混沌光信号的带



(a1) 布尔混沌信号时序 (b1) 布尔混沌光信号时序

(a2) 布尔混沌信号功率谱 (b2) 布尔混沌光信号功率谱



（a3）布尔混沌信号自相关曲线　（b3）布尔混沌光信号自相关曲线

图 2　布尔混沌信号和布尔混沌光信号的时序、功率谱、自相关曲线

宽也相应减小，约为 590 MHz。

利用混沌信号作为雷达探测信号，目标距离信息的解调是通过相关运算实现的。混沌回波信号和参考信号的相关函数定义为

$$R(\tau)=\frac{1}{T}\int_0^T S_{\mathrm{ref}}(t)S_0(t-\tau)\mathrm{d}t\approx k\delta(t-\tau_0) \tag{1}$$

式中，$S_{\mathrm{ref}}(t)$ 表示参考信号，$S_0(t-\tau)$ 表示回波信号，T 表示相关时间，k 表示激光信号在传播过程中的损耗系数。将采集的参考信号和回波信号在固定长度内进行上式的互相关运算，当 $\tau=\tau_0$ 时，$R(\tau)$ 有最大值。τ_0 是参考信号和回波信号之间的时间延迟。通过相关峰值位置确定 τ_0，再已知激光信号在传输介质中的速度 v_0，进而可以得到目标距离

$$D=\frac{1}{2}v_0\tau_0=\frac{1}{2}\frac{c}{n}\tau_0 \tag{2}$$

式中，c 为真空中的光速，n 为传输介质折射率。本实验系统用于水下目标探测，$n=1.33$ 为水的折射率。需要说明的是，由于实验系统中目标回波信号相对于参考信号的时间延迟包含水中延迟和空气中延迟两部分，在实验数据处理中需要进行零参考点修正。实验中选择水箱的前端入射窗口内壁为距离零点位置。

2　实验结果与分析

在实验室水箱环境下开展了水下目标探测实验，探究了水体浑浊程度对水下目标测距和成像的影响。

实验中所用水箱体积（长宽高）为 150 cm×40 cm×30 cm。实验中，从水箱正面入射光的功率为 90 mW。滑石粉难溶于水，实验中通过在水箱中注入自来水和直径约为 40 μm 的滑石粉颗粒来模拟浑浊程度不同的水质，改变水的衰减系数。

2.1　水体衰减系数测量

为了定量描述水体浑浊程度，首先需要对不同滑石粉浓度下的水体衰减系数进行测量。如果将水箱中的目标分别放置在距离前端入射窗口 x_1 和 x_2 处，入射光 I_0 经目标反射后的光强，根据比尔-朗伯定律，可以分别表示为

$$I_1=I_0\alpha^2\beta\exp(-C\cdot 2x_1) \tag{3}$$

$$I_2=I_0\alpha^2\beta\exp(-C\cdot 2x_2) \tag{4}$$

式中，α 为水箱入射窗口的透过率，β 为目标反射率，C 是衰减系数，单位是 m^{-1}。则水体衰减系数为

$$C=\frac{\ln(I_1/I_2)}{2(x_2-x_1)} \tag{5}$$

所以确定 x_1 和 x_2 之间的距离以及两个位置处的回波信号强度即可得到水体衰减系数。

实验中首先将实验室的自来水静置一天，待水质稳定后作为测试样本 1，将一块反射率为 90% 的平面漫反射板作为目标，分别放置在距离水箱入射窗参考零点为 50，75 和 100 cm 位置处，测得相对洁净的自来水衰减系数分别为 1.00，0.98 和 0.99 m^{-1}，则平均衰减系数为 0.99 m^{-1}。之后在样本 1 中逐步加入不同质量的滑石粉颗粒，充分搅拌均匀后，得到

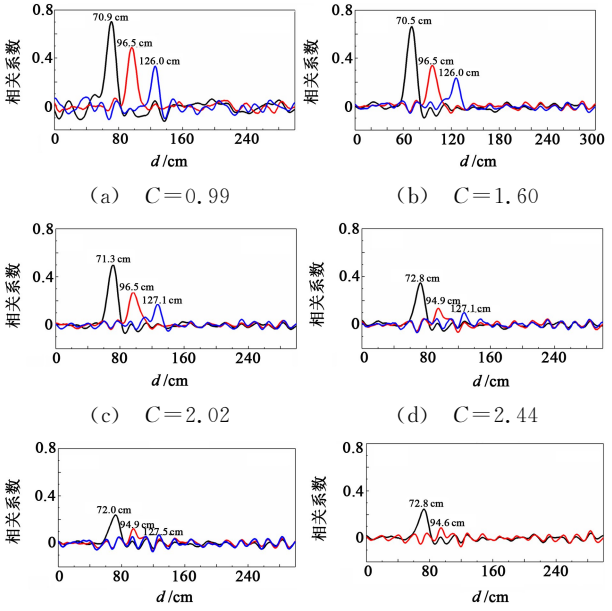
表 1　不同水体的衰减系数

样本	目标距离/m	衰减系数/m^{-1}	平均衰减系数/m^{-1}
1	0		0.99
	0.50	1.00	
	0.75	0.98	
	1.00	0.99	
2	0		1.60
	0.50	1.58	
	0.75	1.59	
	1.00	1.63	
3	0		2.02
	0.50	2.05	
	0.75	2.01	
	1.00	2.00	
4	0		2.44
	0.50	2.37	
	0.75	2.48	
	1.00	2.38	
5	0		2.80
	0.50	2.73	
	0.60	2.90	
	0.75	2.82	
6	0		3.04
	0.50	2.97	
	0.60	3.05	
	0.75	3.10	

浑浊程度不同，衰减系数不同的水质样本 2～6。样本 2～6 衰减系数测量结果如表 1 所示，平均衰减系数分别为 1.60，2.02，2.44，2.80 和 3.04 m^{-1}。实验中水质样本 5 和 6 浑浊程度高，回波功率衰减大，误差增大，所以测量目标位置变更为 50，60 和 75 cm。

2.2 水下目标距离测量

仍将漫反射平板作为待测目标浸没于水箱中。分别在衰减系数不同的各种浑浊水质中，沿水箱长度方向移动待测平板，放置位置分别距离水箱入射窗零点大约为 70，95 和 126 cm，测距结果如图 3 所示。



(a) $C=0.99$ (b) $C=1.60$ (c) $C=2.02$ (d) $C=2.44$ (e) $C=2.80$ (f) $C=3.04$

图 3 在不同衰减系数下，不同位置水下目标测距结果

显然随着衰减系数的增加，目标的回波信号变得越来越弱，相关曲线中，不同距离处的目标峰值逐渐降低。当浑浊水体的衰减系数增加至 3.04 m^{-1}，探测信号已经衰减到无法接收位于 126 cm 处的目标回波信号。

这里用峰值噪声比(Peak-to-Noise Ratio，PNR)来定量衡量测距相关曲线的目标峰值和基底噪声之间的关系

$$PNR = 10 \times \lg\left[\frac{P_{\text{peak}}}{\bar{n} + 3\text{std}(n)}\right] \tag{6}$$

式中，P_{peak} 为相关曲线的目标峰值大小，$\bar{n}$ 表示相关曲线基底噪声平均值，std(n)表示基底噪声的标准偏差。随着水质浑浊程度的增加，测距相关曲线 PNR 与衰减系数之间的定量变化关系如图 4 所示，PNR 随着水质衰减系数的增加而线性减小。

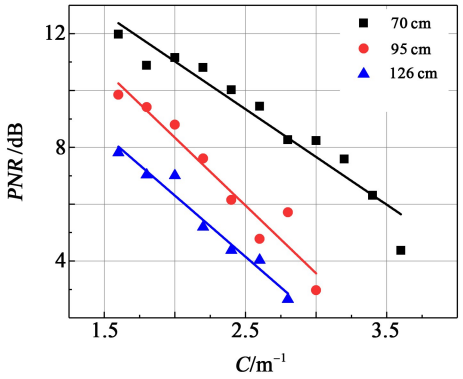


图 4 PNR 随衰减系数的变化关系曲线

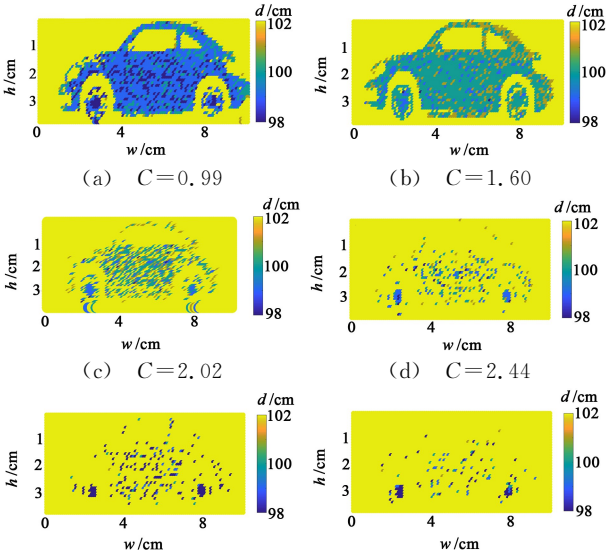
2.3 水下目标扫描成像

实验中将如图 6 所示的一个尺寸为 9 cm×3.5 cm×3 cm，表面为金属材质，反射率约为 0.6 的汽车模型浸没于水箱中，位置距离水箱前端入射窗口约 100 cm。实验分析各种浑浊程度不同的水质对其成像效果的影响。成像像素点为 105×40。



图 5 目标实物照片

在不同衰减系数的水质样本下，汽车模型的三维成像距离图如图 6(a)～(f)所示。图中横纵坐标表示汽车的宽度与高度，右侧色度条的不同颜色表示车体不同位置处的距离信息。



(a) $C=0.99$ (b) $C=1.60$ (c) $C=2.02$ (d) $C=2.44$ (e) $C=2.80$ (f) $C=3.04$

图 6 在不同衰减系数下目标的三维成像距离图

从图 6(a)可以看出，在自来水中尚未加入滑石粉颗粒，水质相对洁净，当衰减系数为 0.99 m^{-1} 时，汽车模型整体轮廓清晰可见，车轮、车窗、车灯等位置处的细节都充分展现。随着水箱中不断加入滑石粉颗粒，衰减系数逐渐增加，汽车模型的成像质量恶化越来越严重，雷达系统接收到的有效回波点数减少，丢失和错误的目标距离信息数据明显增加。如图 6(d)所示，当衰减系数增加到 2.44 m^{-1} 时，勉强可以识别汽车的轮廓，除了反射率较高的轮胎中心，很多细节已经几不可见。图 6(f)是衰减系数增加到 3.04 m^{-1} 时的成像结果，由于悬浮颗粒的散射和水体对探测光的吸收，已经完全无法实现目标成像。

为了定量衡量目标三维距离成像质量恶化的程度，引入图像错误概率

$$P_{\mathrm{img}}=\frac{N_{\mathrm{error}}}{N_{\mathrm{total}}}\times 100\% \tag{7}$$

式中，P_{img} 是重构图像中出现距离测量错误点的概率，N_{total} 是目标所有像素点总数。选取图 6(a)中尚未加入滑石粉颗粒，能够清晰成像时的点云数据为标准参考点云。N_{error} 是加入滑石粉颗粒后，不同衰减系数下测量的目标点云与标准点云数据对比，出现错误测量点的个数。如图 7 所示，随着水质衰减系数的逐渐增加，三维成像距离图中出现错误点的概率也逐渐增加。当衰减系数为 2.5 m^{-1} 时，成像错误点的概率达到 50%。

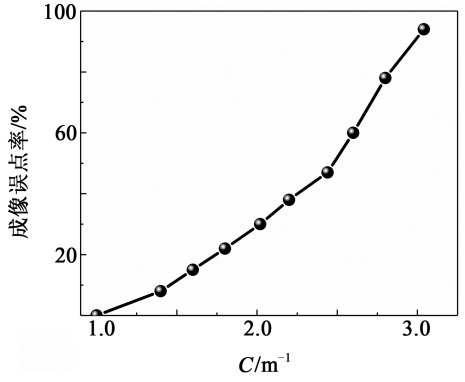
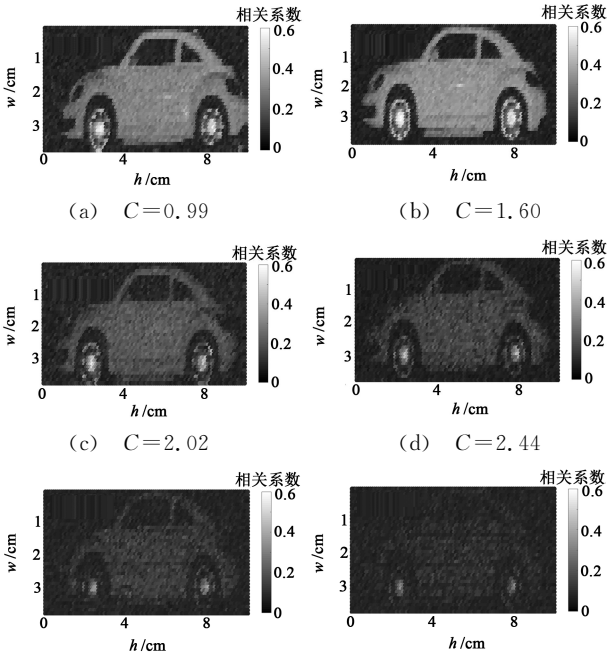


图 7　不同衰减系数下目标成像错误概率

图 8(a)～(f)是在各种衰减系数不同的浑浊水质中，根据相关曲线目标峰值的大小得到的三维成像能量图，色度条颜色代表不同像素点的目标峰值相关系数，可以反映出各个像素点回波信号强度的大小。同样的，可以从图 8(a)看出，在水质衰减系数为 0.99 m^{-1} 的自来水中，汽车模型的轮廓和细节都清晰可见。能清晰看出车轮有很强的反射，而车窗处相关系数几乎为 0，这是因为车窗是黑色，吸收了雷达系统发出的信号。随着水箱中不断加入滑石粉颗粒，水质浑浊程度越来越高，从汽车模型反射的回波信号也越来越弱。图 8(f)是衰减系数增加到 3.04 m^{-1} 时，除了两个车轮位置还可以识别，车体轮廓已经无法分辨。



(a)　$C=0.99$　　(b)　$C=1.60$

(c)　$C=2.02$　　(d)　$C=2.44$

(e)　$C=2.80$　　(f)　$C=3.04$

图 8　不同衰减系数下目标三维成像能量图

3　结论

混沌激光具有高频、宽带特性和较强的抗干扰能力等优点，可以有效地抑制后向散射。本文使用布尔混沌信号发生器直接调制激光器并将产生的混沌激光作为光源，结合扫描成像技术，设计了一套水下三维成像雷达系统，对浸没于各种衰减系数不同的浑浊水质中的目标三维成像进行了实验研究。

参考文献：

[1] Mazel C H, Strand M P, Lesser M P, et al. High-resolution determination of coral reef bottom cover from multispectral fluorescence laser line scan imagery [J]. Limnology and Oceanography, 2003, 48(1/2): 522-534.

[2] Jaffe J S. Underwater optical imaging: the past, the present, and the prospects[J]. IEEE J. of Oceanic Engineering, 2014, 40(3): 683-700.

[3] Ma J, Lu T, He Y, et al. Compact dual-wavelength blue-green laser for airborne ocean detection lidar[J]. Appl. Opt., 2020, 59(10): C87-C91.

[4] Cariou J, Lotrian J. Transmission characteristics of a pulsed laser

beam in natural sea-water: determination of the attenuation coefficients in the 415～660 nm spectral range[J]. J. of Phys. D: Appl. Phys., 1982, 15(10): 1873-1880.

[5] Tan C S, Seet G, Sluzek A, et al. Scattering noise estimation of range-gated imaging system in turbid condition[J]. Opt. Express, 2010, 18(20): 21147-21154.

[6] Zevallos M E, Gayen S K, Alrubaiee M, et al. Time-gated backscattered ballistic light imaging of objects in turbid water[J]. Appl. Phys. Lett., 2005, 86(1): 011115.

[7] McLean E A, Burris H R, Strand M P. Short-pulse range-gated optical imaging in turbid water[J]. Appl. Opt., 1995, 34: 4343-4351.

[8] Gordon H R. Interpretation of airborne oceanic lidar: effects of multiple scattering[J]. Appl. Opt., 1982, 21(16): 2996-3001.

[9] Kouzoubov A, Brennan M J, Thomas J C. Treatment of polarization in laser remote sensing of ocean water[J]. Appl. Opt., 1998, 37(18): 3873-3885.

[10] Lewis G D, Jordan D L, Roberts P J. Backscattering target detection in a turbid medium by polarization discrimination[J]. Appl. Opt., 1999, 38: 3937-3944.

[11] Pellen F, Intes X, Olivard P, et al. Determination of sea-water cut-off frequency by backscattering transfer function measurement [J]. J. of Phys. D: Appl. Phys., 2000, 33(4): 349-354.

[12] Mullen L J, Contarino V M. Hybrid lidar-radar: seeing through the scatter[J]. IEEE Microwave Magazine, 2000, 1(3): 42-48.

[13] Pellen F, Olivard P, Guern Y, et al. Radio frequency modulation on optical carrier for target detection enhancement in sea water [C]// Conference on Ocean Optics: Remote Sensing and Underwater Imaging, 2001.

[14] Morvan L, Lai N D, Dolfi D, et al. Building blocks for a two-frequency laser lidar-radar: a preliminary study[J]. Appl. Opt., 2002, 41: 5702-5712.

[15] Mullen L, Cochenour B, Laux A, et al. Optical modulation techniques for underwater detection, ranging and imaging[J]. Proc. SPIE, 2011, 8030: 803008.

[16] Connor S O, Lee R, Mullen L, et al. Waveform design considerations for modulated pulse lidar[J]. Proc. SPIE, 2014, 9111: 91110P.

[17] Cochenour B, Mullen L, Muth J. Modulated pulse laser with pseudorandom coding capabilities for underwater ranging, detection, and imaging[J]. Appl. Opt., 2011, 50(33): 6168-6178.

[18] Lin F Y, Liu J M. Chaotic lidar[J]. IEEE J. of Sel. Top. in Quantum Electron., 2004, 10(5): 991-997.

[19] Rumbaugh L K, Bollt E M, Jemison W D, et al. A 532 nm chaotic lidar transmitter for high resolution underwater ranging and imaging[C]// 2013 OCEANS, 2013: 1-6.

[20] Wang B, Guo Z, Shen Z, et al. Underwater 3D imaging utilizing 520 nm chaotic lidar[J]. J. of Russian Laser Research, 2020, 41(4): 399-405.

[21] 马 荔, 张建国, 李 璞, 等. 基于自治布尔网络的高速物理随机数发生器研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, 49(4): 888-892.

Ma Li, Zhang Jianguo, Li Pu, et al. High-speed physical random number generator based on autonomous Boolean networks[J]. J. of Central South University (Science and Technol.), 2018, 49(4): 888-892.

作者简介:

张鹏程(1995—),男,山西省忻州市人,硕士研究生,主要从事水下激光雷达探测相关研究;

王冰洁(1978—),女,山西省大同市人,博士,教授,主要从事激光雷达探测与成像研究。