

# 面向水下测距的混沌调制激光雷达

张明涛<sup>1,2</sup> 张建忠<sup>1,2</sup> 张建国<sup>1,2</sup> 徐航<sup>1,2</sup> 张明江<sup>1,2</sup> 王安帮<sup>1,2</sup> 王云才<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>太原理工大学物理与光电工程学院, 山西 太原 030024

<sup>2</sup>太原理工大学新型传感器与智能控制教育部重点实验室, 山西 太原 030024

**摘要** 提出一种用于水下测距的混沌调制激光雷达方案,并进行了实验验证。该方案利用布尔混沌电路产生的混沌电信号调制半导体激光器,获得 532 nm 混沌激光,并将其分成两束,分别作为探测光信号和参考光信号。将探测光信号入射到 1.5 m×0.3 m×0.3 m 的水槽中,直接照射水下探测目标。经目标反射回的探测光信号和参考光信号分别经过光电探测器转换成电信号,再利用相关运算即可获取水下目标的距离。经过原理性实验验证,获得的最小和最大探测距离分别为 0.14 m 和 1.36 m,距离分辨率为 51 cm,目标测距结果的平均误差在 2.3 cm 以内。该混沌调制激光雷达具有测量盲区小、结构简单的特点,可作为一种新的水下目标测距技术。

**关键词** 激光技术;混沌;激光雷达;水下测距;相关法;532 nm 激光

**中图分类号** TN958.98 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP53.051402

## Chaotic Modulation Lidar for Underwater Ranging

Zhang Mingtao<sup>1,2</sup> Zhang Jianzhong<sup>1,2</sup> Zhang Jianguo<sup>1,2</sup> Xu Hang<sup>1,2</sup>

Zhang Mingjiang<sup>1,2</sup> Wang Anbang<sup>1,2</sup> Wang Yuncai<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>College of Physics and Optoelectronics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China

<sup>2</sup>Key Laboratory of Advanced Transducers and Intelligent Control System, Ministry of Education, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China

**Abstract** A chaotic modulation lidar for underwater ranging is proposed and demonstrated experimentally. The 532 nm chaotic laser is generated by a chaotic electrical signal produced by a Boolean chaotic circuit directly modulating the diode laser. It is divided into two beams as the probe light and the reference light signal, respectively. The probe light signal is injected into a water tank of 1.5 m×0.3 m×0.3 m to directly illuminate the underwater target. The probe light reflected from the target and the reference light are separately converted into the electrical signals by the photoelectric detector. The distance of the underwater target can be achieved by the cross-correlation between both of the electrical signals. Through the theoretical experiment demonstration, the minimum and maximum detection distance of 0.14 m and 1.36 m are obtained respectively. The range resolution is 51 cm and the average error of the target ranging results is within 2.3 cm. The chaotic lidar can be a new technology of underwater ranging owing to its essential characteristics of the small measuring blind area and the simple structure.

**Key words** laser technique; chaos; lidar; underwater ranging; correlation; 532 nm laser

**OCIS codes** 140.7300; 140.1540; 280.3640

## 1 引言

水下测距技术在水下工程安装和检修、海底沉船及飞机残骸的搜索、海洋生态观测等民用领域,以及水下探雷、探潜、反潜等军事领域中都有重要应用。特别是,我国自主研发的“蛟龙号”载人潜水器 7020 m 海

**收稿日期:** 2015-11-11; **收到修改稿日期:** 2015-12-21; **网络出版日期:** 2016-04-15

**基金项目:** 国家自然科学基金(61205142,61377089,61527819,51404165)、山西省自然科学基金(2015011049)

**作者简介:** 张明涛(1990—),男,硕士研究生,主要从事水下探测方面的研究。E-mail: sxyjzmt@163.com

**导师简介:** 张建忠(1979—),男,博士,副教授,主要从事水下探测、光纤传感等方面的研究。

E-mail: zhangjianzhong@tyut.edu.cn(通信联系人)

试成功,为水下测距技术提供了更广阔的应用前景。

目前,声纳测距技术被广泛应用于水下目标的距离测量。它是利用水声换能器发射和接收声波信号,根据波束在水中的往返时间以及声速确定目标物距离<sup>[1]</sup>。德国 L3 ELAC Nautk 公司已研制出声纳 Seabeam 系列产品,最大测距为 11000 m<sup>[2]</sup>。声纳测距技术主要适合深水区域远距离目标的测量,而在浅水区域,由于温跃层对声场分布的影响,会使声纳测距技术测得错误的距离信息。

为了弥补声纳测距技术在浅水区域的不足,人们相继提出了基于激光雷达的水下测距技术。水下激光雷达技术主要采用水下传输窗口的蓝绿激光作为探测信号,其测距原理与自由空间中的激光雷达相似,主要有时间飞行法、相位测量法和三角测量法。Klepsvik 等<sup>[3]</sup>通过测量发射和接收脉冲在水中的飞行时间获得了海底地形的距离信息。然而,时间飞行法存在测量距离和空间分辨率之间的矛盾问题,为了增加测量距离必须以牺牲空间分辨率为代价。Arshad 等<sup>[4]</sup>利用正弦调制 532 nm 激光器产生探测信号,通过测量发射和接收信号的相位差进行水下目标距离的测量。为了消除正弦信号引入的周期模糊距离,美国克拉克森大学和海军航空系统司令部合作进一步采用频域反射测量技术和相位测量法相结合的技术进行水下目标的测量<sup>[5]</sup>。但是,相位测量法易受环境干扰,要实现高精度的测量,需要具备高性能的系统设备,成本昂贵。英国赫瑞瓦特大学利用三角测量法进行水下场景距离的扫描测量,并提出了测量系统中的三角基线校准的新方法<sup>[6]</sup>。但该方法需要根据三角关系计算距离信息,要求发射和接收单元需满足特定的结构关系,实际操作不便。近来,基于信号相关法的测距技术<sup>[7-8]</sup>被用于水下目标距离的测量。例如,利用伪随机码调制激光输出脉冲信号,通过互相关技术获取水下目标的距离信息<sup>[9]</sup>。这种技术因所用的伪随机码序列具有周期性,进而使测量距离受限;降低伪随机码的码长可提高空间分辨率,但码长较小的伪随机码发生器价格昂贵。Rumbaugh 等<sup>[10]</sup>采用超长腔的光纤激光器产生 1064 nm 混沌种子光,通过倍频效应获取 532 nm 混沌激光,再利用相关法实现水下目标的距离测量。然而,混沌绿光的产生过程非常复杂,系统稳定性差,不宜应用于实际的水下环境。

本文基于自制的布尔混沌电路<sup>[11]</sup>直接调制半导体激光器产生 532 nm 混沌激光,结合相关法用于水下目标的距离测量。该混沌绿光源结构简单,输出稳定,避免了混沌激光倍频效应苛刻的调节过程。获得了最小和最大探测距离分别为 0.14 m 和 1.36 m,距离分辨率为 51 cm,目标测距结果的平均误差在 2.3 cm 以内的实验结果。

## 2 实验系统

基于混沌调制激光雷达实现水下目标距离测量的实验装置如图 1 所示。虚线框内的混沌绿光源由布尔混沌电路和 532 nm 半导体激光器构成。此混沌光源的输出经光纤耦合器 1 分成两路,其中,强度为 3.4% 的一路作为参考光直接经光电探测器 1(PD1)转换为电信号;强度为 60% 的另一路进入光纤耦合器 2 再经一个大口径的光纤准直器作为探测光发射进入水槽,此处的大口径光纤准直器既作为发射窗口又作为接收窗口。当探测光遇到水槽中的目标物时发生反射,反射回的探测光进入光纤准直器,再经光纤耦合器 2 进入光电探测器 2(PD2)转换为电信号。经 PD1 和 PD2 转换后的电信号由实时示波器记录其相应的波形,波形数据通过计算机实现互相关运算,从而得到水槽中目标物的距离信息。图中红线和绿线分别表示电信号和光信号传输过程。

实验中所用的布尔混沌电路是由课题组设计,其电路原理图如图 2 所示。内部主要有三个高速电子逻辑器件:两个异或(XOR)门 1 和 2,以及一个异或非门 3[由异或门、非门(NOT)级联实现]。这三个逻辑门形成了三个结点,进一步级联构成了一个带有延时反馈的布尔网络,即无同步时钟网络。该反馈网络的每个支路都有时延,其中, $\tau_{12}$ 、 $\tau_{21}$ 、 $\tau_{22}$ 、 $\tau_{13}$ 、 $\tau_{31}$  和  $\tau_{33}$  分别表示各结点之间反馈信号的传输时延,这些时延可以通过在链路中加入施密特触发器来实现。通过改变逻辑器件工作电压引起的时延变化来调节布尔混沌电路的输出特性。带有延时反馈的自治布尔网络与逻辑器件自身非理想特性(如低通滤波特性、退化特性等)的结合是布尔混沌电路产生混沌的原因<sup>[11]</sup>。

在实验中,当工作电压逐渐增加时,布尔混沌电路的输出信号会从周期进入混沌。利用可调衰减器(Agilent8494B)对布尔混沌电路输出的信号幅值进行调节,进一步实现对 532 nm 半导体激光器的直接调

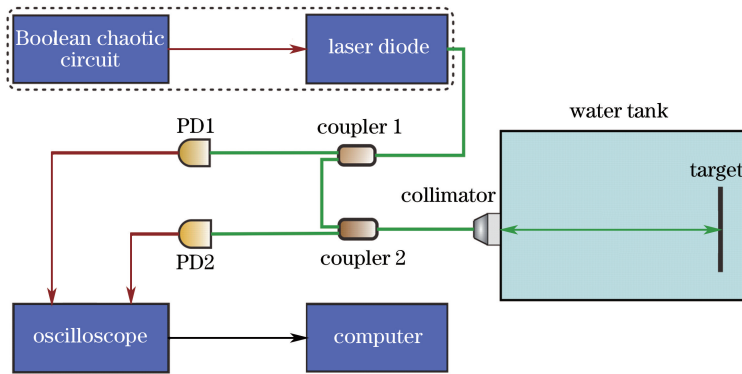


图 1 基于混沌调制激光雷达水下测距系统实验装置

Fig. 1 Experimental setup of underwater ranging system based on chaotic modulation lidar

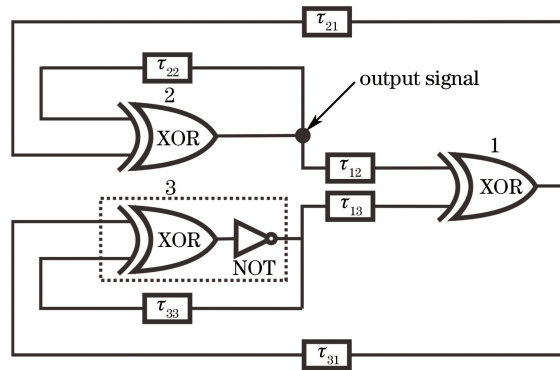


图 2 布尔混沌原理图

Fig. 2 Principle diagram of Boolean chaos

制。半导体激光器是一个直调激光模块(KG-ELD-532-20-M),由高功率激光二极管、驱动电路、温控电路集成。输出的混沌光信号是基于光纤传输,并由光纤耦合器实现光的分路,这可保证混沌激光在自由空间传输时不受外界环境的影响。目前市场上没有中心波长为 532 nm 的光纤耦合器,在此采用中心波长为 1550 nm 的光纤耦合器,根据实测重新进行了标定,其对 532 nm 混沌激光的分光比、附加损耗、插入损耗,光纤耦合器 1 和光纤耦合器 2 的具体参数如表 1 所示。所用光电探测器(KG-PR-200M-B-FC)的带宽为 200 MHz、最小探测功率为  $-36$  dBm。利用带宽为 3.5 GHz、采样率为 40 GS/s 的实时示波器(Tektronix, DPO7354)对混沌信号进行存储。

表 1 对于传输波长 532 nm 的激光,中心波长 1550 nm 光纤耦合器的参数测定情况

Table 1 Parameter measurement of fiber coupler with the center wavelength of 1550 nm for the transmission wavelength of 532 nm

	Coupler 1	Coupler 2
Coupling ratio	6 : 94	2 : 98
Excess loss/dB	2.54	2.71
Insertion loss/dB	$-14.70@ 6\%$	$-21.10@ 2\%$
	$-2.81@ 94\%$	$-2.77@ 98\%$

### 3 测距原理

混沌调制激光雷达的水下测距原理是基于混沌激光强度的相关特性,即混沌激光信号与它延迟的混沌信号之间的相关函数呈类  $\delta$  函数形状。利用互相关曲线的  $\delta$  峰来判定延迟时间,再结合水中的光速,从而可获得水下目标的距离信息。其中,混沌激光信号的产生可由布尔混沌电路产生的电混沌信号对 532 nm 激

光源直接调制获得。其混沌产生的关键在于布尔混沌电路,可通过布尔延迟方程描述<sup>[12]</sup>为

$$\begin{cases} x_1(t) = x_2(t - \tau_{12}) \oplus x_3(t - \tau_{13}) \\ x_2(t) = x_1(t - \tau_{21}) \oplus x_2(t - \tau_{22}) \\ x_3(t) = x_1(t - \tau_{31}) \oplus x_3(t - \tau_{33}) \oplus 1 \end{cases}, \quad (1)$$

式中  $x_i(t)$  为每个结点的布尔变量,  $\tau_{ji}$  为结点之间反馈信号的传输时延,如图 2 所示,  $\oplus$  表示异或操作。通过控制时延  $\tau_{ji}$ , 可使布尔混沌电路输出混沌信号。

利用布尔混沌电路产生的混沌电信号直接调制激光源可获得混沌激光信号,假设混沌激光参考信号为  $X(t)$ , 经水槽中目标物反射回来的探测信号为  $Y(t + \tau)$ , 其中  $\tau$  是回波信号相对于参考信号的时延。进行互相关运算可得两个信号的互相关函数

$$R_{xy}(\tau) = X(t) \otimes Y(t + \tau) \approx k\delta(\tau), \quad (2)$$

式中符号“ $\otimes$ ”为互相关运算符,系数  $k$  为归一化系数。

从图 1 的实验装置可以看出,探测信号和回波信号都会在水和光纤两种介质中传播,因此(1)式中  $\tau$  应为  $\tau = \tau_0 + \tau_1$ , 其中  $\tau_0$ 、 $\tau_1$  分别为光纤介质中的总时延和水介质中的总时延。根据混沌激光信号的互相关曲线主峰值可提取出总的时延  $\tau$ , 再算出光纤介质中的总时延  $\tau_0$ , 便可以得到水槽中待测目标的距离

$$D = c \cdot \tau_1 / (2n), \quad (3)$$

式中  $\tau_1 = \tau - \tau_0$ ,  $c$  为水中光速,  $n$  为水相对于空气的折射率。

基于混沌调制激光雷达的水下测距系统有两个重要参数:距离分辨率和动态范围。这两个参数可直接由混沌激光探测信号与参考信号的互相关曲线特征获得。通过互相关曲线的半峰全宽(FWHM),即主峰峰值一半所对应的时间宽度,可获得水下测距的距离分辨率;通过互相关曲线的旁瓣水平(PSL),即相关曲线中次最大值与峰值的比值,可计算水下测距的动态范围。当 FWHM 较大时,会使系统对多目标的分辨能力下降;当 PSL 值较大(不小于 1)时,则会引起系统对目标物的误判,这样必然会影响到系统的动态范围。

## 4 实验结果及分析

### 4.1 布尔混沌特性

当驱动电压为 2.85 V 时,布尔混沌电路输出稳定的混沌信号。图 3 给出了混沌信号相应的时序、功率谱、相图和自相关曲线。混沌信号的时序如图 3(a)所示,信号的峰峰值电压约为 2.2 V。图 3(b)为混沌信号的功率谱,其混沌带宽为 500 MHz,带宽定义为从直流到能量为 80%处所对应的频率之间的范围<sup>[13]</sup>。混沌信号的自相关曲线如图 3(c)所示,呈现类似  $\delta$  函数的形状,相应的 FWHM 为 1.48 ns,峰值 PSL 为 -8.67 dB。

### 4.2 混沌绿光特性

实验系统中的混沌绿光由布尔混沌电路直接调制波长为 532 nm 的直调激光模块产生,这种混沌绿光

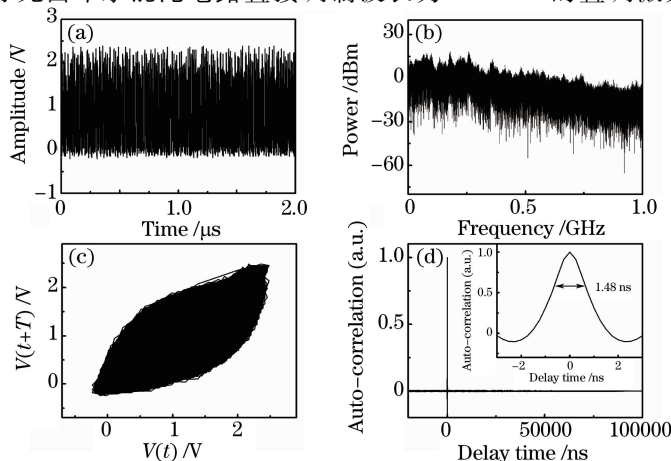


图 3 布尔混沌特性

Fig. 3 Characteristics of Boolean chaos



源结构简单,性能稳定。混沌电信号直接调制激光模块可产生光功率为 $-1$  dBm 的稳定的混沌绿光信号,其时序、频谱、相图和自相关曲线分别如图 4(a)~(d)所示。从图 4(a)可以看出,混沌绿光峰峰值电压约为 $120$  mV,相较于布尔混沌电信号有所下降,但仍具有类噪声特性,其幅值随机变化;图 4(b)中的频谱表明探测到的混沌绿光的带宽为 $200$  MHz,受限于所使用的光电探测器的带宽,高于 $200$  MHz 的部分被滤除;图 4(d)中的自相关曲线有着类似 $\delta$ 函数的形状,并且理论上,混沌信号的带宽越宽,FWHM 越窄<sup>[14]</sup>,而混沌绿光的带宽比布尔混沌电信号的带宽小,其 FWHM 则会展宽,但从其中的插图可以看出自相关曲线的 FWHM 为 $4$  ns,PSL 为 $-10.1$  dB。这说明混沌绿光仍具有良好的自相关性,可用作测量水下目标距离的探测信号。

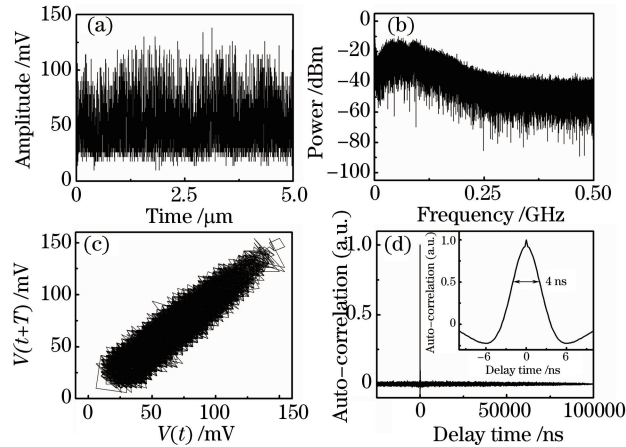


图 4 混沌绿光特性。(a) 时序;(b) 频谱;(c) 相图;(d) 自相关曲线,插图为主峰放大图,显示了 FWHM 和 PSL

Fig. 4 Characteristics of chaotic green light. (a) Time series; (b) spectrum; (c) phase portrait; (d) auto-correlation trace, the inset shows the FWHM and PSL

### 4.3 测量结果分析

为了验证混沌调制激光雷达水下测距的可行性,在 $1.5\text{ m} \times 0.3\text{ m} \times 0.3\text{ m}$ 的水槽里放置反射率约为 $95\%$ 的平面镜作为探测目标物,进行水下测距的实验。在测量之前,需对测量系统中探测信号和回波信号在光纤中传输的总时延 $\tau_0$ 进行标定,其标定的结果为 $\tau_0 = 22.5$  ns。随后将平均功率为 $-5.2$  dBm 的探测光信号入射到水体衰减系数为 $0.14\text{ m}^{-1}$ 的水槽中。任意改变水槽中探测目标物的位置可实现水下不同距离目标的测量。实验初步获得了最远距离为 $1.36$  m 和最近距离 $0.14$  m 的测量结果,如图 5 所示。

此外,如果水槽前表面的反射光较强,则在反射回来的探测光和参考光的互相关曲线上会出现水槽前表面位置对应的旁瓣,这可能会对水槽中实际目标的探测产生误判。因此,在实际测量中,先进行预处理,对水槽前表面的位置信息先进行测量标定,再对水槽中实际目标的位置信息进行测量,然后对两次测量值作差,就可获得实际目标在水槽中的距离信息。

进一步分析混沌调制激光雷达水下测距系统的距离分辨率和测量距离之间的关系。实验中,对水槽中不同位置处的目标物进行测量,分析其距离分辨率的变化情况。图 6 给出了探测目标在 $0.28$ 、 $0.57$ 、 $0.98$ 、 $1.36$  m 四个不同位置处的测量结果。可以看到,不同距离所对应的 FWHM 皆相同且都为 $51$  cm。基于混沌调制激光雷达的水下测距系统,当探测距离比较短时,其距离分辨率与测量距离无关,这是因为在原理上,混沌调制激光雷达系统采用混沌激光信号作为探测信号,其距离分辨率主要是由探测信号和参考信号的互相关曲线的半峰全宽确定,而与探测距离无关,从根本上克服了基于脉冲探测信号的雷达系统存在距离分辨率与探测距离矛盾的问题。然而,在实际测量中,混沌激光信号在水介质中传输,随着传输距离的增加,损耗和色散效应的累积,自身波形会发生变化,从而会影响雷达系统的距离分辨率。此外,光电探测器的带宽、噪声和灵敏度等因素也会对该雷达系统的距离分辨率产生影响。在进一步的工作中将会详细分析影响混沌调制激光雷达系统性能的因素。

最后,对混沌调制激光雷达水下测距结果对应的测量误差进行了分析。将基于混沌调制激光雷达的测距结果与利用钢卷尺测距的测量结果进行了对比。利用钢卷尺测量目标物的距离,是一种常用的方法,其精

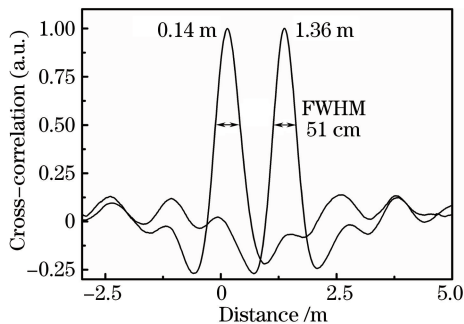


图 5 水下测距的实验结果

Fig. 5 Experimental results of underwater ranging

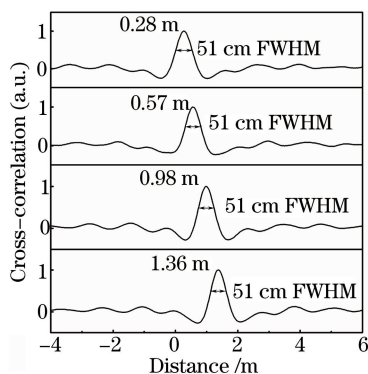


图 6 不同测量距离时,系统的距离分辨率均为 51 cm

Fig. 6 All range resolution is 51 cm for different measured distances

度在毫米量级。在此,将利用钢卷尺获得的目标物的距离值作为标准实际值。图 7 给出了基于混沌调制激光雷达的水下目标的测量值与利用钢卷尺获得的水下目标的实际值之间的误差。在 50.0 cm 至 140.0 cm 之间,选取了 9 个距离点进行比较,即:55.1、70.9、77.6、91.1、100.1、109.1、118.1、127.1、136.1 cm,其平均误差约为 2.3 cm。

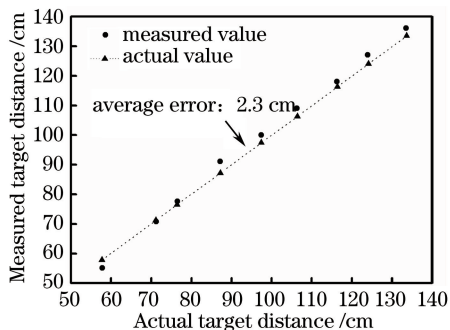


图 7 测量值与实际值之间的误差

Fig. 7 Error between the measured value and the actual value

## 5 讨 论

对基于混沌调制激光雷达的水下测距的实验方案进行了验证,获得了水下距离最近为 0.14 m 和最远为 1.36 m 的测量结果,这一结果可能与激光源的输出功率、激光发散角、水介质的损耗、光电探测器的灵敏度等因素有关。为了进一步增加水下测距的最远距离,可借鉴现有的机载激光雷达系统中所使用的高功率绿光激光器技术。目前,加拿大、瑞典、澳大利亚、美国等国家相继研制出了机载激光雷达测量系统,利用高功率绿光激光器可以实现海深为 50 m 左右的水下地形测量<sup>[15]</sup>。在此,本课题组提出利用半导体激光器模块抽

运 Nd:YAG 激光晶体, 然后进行倍频, 基于倍频晶体中的多纵模非线性耦合过程产生高功率、宽带混沌绿光<sup>[16]</sup>。设置半导体激光器模块的工作电流为  $I = 20.8$  A, 倍频晶体 e 轴和四分之一波片快轴之间的夹角  $\phi = \pi/4$ , 则该混沌固体激光器可产生波长为 532 nm、带宽为 10 GHz 以上、平均功率为 85 W 的混沌绿光。根据激光雷达水中测距方程, 可以估算该混沌固体激光器水下测距的能力。

$$P_r = \frac{P_t \kappa(\lambda) A_0}{\pi \left(\frac{h}{n}\right)^2} \rho(\lambda) \exp[-2\mu(\lambda)L], \quad (4)$$

式中  $P_r$  为激光垂直射入水下目标后反射返回到测量仪器的功率,  $P_t$  为混沌固体激光器输出的光功率, 在此选取的光功率为 85 W。  $\kappa(\lambda)$  为接收光学系统的光谱透射率, 其值为 0.9。  $A_0$  为接收光学系统的有效孔径, 当主接收孔径的直径  $\varphi$  为 200 mm 时,  $A_0 = 0.0314$  m<sup>2</sup>。  $n$  为水体的折射率, 其值约为 1.33;  $\rho(\lambda)$  为水下目标的反射率取 0.1。  $\mu(\lambda)$  为水体的衰减系数, 当水体的浊度为 100 NTU 时, 对应的衰减系数大约为 0.3, 水体越清, 衰减系数越小;  $L$  为水下目标到雷达系统的距离。当接收器的探测能力为  $10^{-9}$  W 时, 该混沌固体激光器可测水下目标的距离约为 20 m。

当高功率混沌激光进入水体后, 会发生后向散射, 特别是在实际情况中, 水体的浑浊度较大时, 混沌激光在水中的后向散射比较严重, 极大地限制了基于混沌激光雷达水下测距系统的测量距离。目前, 抑制光在水下后向散射的主要技术<sup>[17]</sup> 有距离选通、激光同步线扫描、调制解调技术等。如何将后向散射抑制技术与基于混沌激光雷达水下测距技术相结合, 提高测距系统的性能, 是下一步开展的研究工作。

## 6 结 论

提出了一种测量水下目标距离的新方法, 利用布尔混沌电路产生的混沌信号直接调制 532 nm 激光模块输出混沌激光信号, 将其分别作为探测信号和参考信号, 通过相关探测可以获取水下目标的距离信息。该水下测距方法与飞行时间法、相位测量法和三角测量法相比, 具有测量盲区小、系统结构简单、性能稳定、成本低廉等特点。该水下测距方法有望发展为基于混沌激光的新型探水雷达, 弥补声纳技术在浅水区域的不足, 推动水下探测领域的进一步发展。

## 参 考 文 献

- Liang Minzan, Meng Hua, Chen Yingchun, *et al.*. Effect of underwater acoustics-environmental complexity on sonar detecting range[J]. Ship Science and Technology, 2013, 35(4): 45-48.  
梁民赞, 孟 华, 陈迎春, 等. 水声环境复杂性对声呐探测距离的影响[J]. 舰船科学技术, 2013, 35(4): 45-48.
- Nautik W E. Discover the unknown[Z/OL]. [2016-3-14]. <http://www.elac-nautik.de/>.
- Klepsvik J O, Bjarnar M, Brosstad P O, *et al.*. A novel laser radar system for subsea inspection and mapping[C]. OCEANS'94 Oceans Engineering for Today's Technology and Tomorrow's Preservation, Proceedings, 1994, 2: 700-705.
- Arshad M R, Lucas J. Underwater optical ranging system for ROV's[C]. OCEANS'98 Conference Proceedings, 1998, 2: 1189-1193.
- Illig D W, Jemison W D, Rumbaugh L, *et al.*. Enhanced hybrid lidar-radar ranging technique[C]. Oceans-San Diego, 2013:1-9.
- Chantler M J, Clark J, Umasuthan M. Calibration and operation of an underwater laser triangulation sensor: The varying baseline problem[J]. Optical Engineering, 1997, 36(9): 2604-2611.
- Yang Fang, Zhang Xin, He Yan, *et al.*. Fiber laser ranging system based on different pseudorandom code modulation [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(6): 0614003.  
杨 芳, 张 鑫, 贺 岩, 等. 基于不同伪随机码调制的光纤激光测距系统[J]. 中国激光, 2014, 41(6): 0614003.
- Wang Guochao, Yan Shuhua, Yang Jun, *et al.*. Theoretical modeling analysis for precise space ranging based on cross-correlation of femtosecond optical frequency comb[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(4): 0412002.  
王国超, 颜树华, 杨 俊, 等. 基于飞秒光梳互相关的空间精密测距理论模型分析[J]. 光学学报, 2015, 35(4): 0412002.
- Cochenour B, Mullen L, Muth J. Modulated pulse laser with pseudorandom coding capabilities for underwater ranging,

- detection, and imaging[J]. *Applied Optics*, 2011, 50(33): 6168-6178.
- 10 Rumbaugh L K, Bollt E M, Li Y F, *et al.*. A 532 nm chaotic lidar transmitter for high resolution underwater ranging and imaging[C]. *Oceans-San Diego*, 2013: 1-6.
- 11 Zhang J G, Xu H, Wang B J, *et al.*. Wiring fault detection with Boolean-chaos time-domain reflectometry[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2015, 80(1-2): 553-559.
- 12 Zhang R, Cavalcante H L, Zheng G, *et al.*. Boolean chaos[J]. *Physical Review E*, 2009, 80(4): 045202.
- 13 Lin F Y, Liu J M. Nonlinear dynamical characteristics of an optically injected semiconductor laser subject to optoelectronic feedback[J]. *Optics Communications*, 2003, 221(1-3): 173-180.
- 14 Wu Yuan, Wang Bingjie, Wang Yuncai. Research progress in applications of chaotic laser[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(6): 060005.  
武 媛, 王冰洁, 王云才. 混沌激光应用研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(6): 060005.
- 15 Ye Xiusong. Research on principle and data processing methods airborne laser bathymetric technique[D]. Zhengzhou: PLA Information Engineering University, 2010: 1-16.  
叶修松. 机载激光水深探测技术基础及数据处理方法研究[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2010: 1-16.
- 16 Zhang Jianzhong, Wang Yuncai, Li Pu, *et al.*. A chaos-based laser device and related method channel depth measurement: 104749579A[P]. 2015-07-01.  
张建忠, 王云才, 李 璞, 等. 一种基于混沌激光装置及其相关法的航道水深测量方法: 104749579A[P]. 2015-07-01.
- 17 Kocak D M, Dagleish F R, Caimi F M, *et al.*. A focus on recent developments and trends in underwater imaging[J]. *Marine Technology Society Journal*, 2008, 42(1): 52-67.