



强度调制532 nm激光水下测距

李坤 杨苏辉 廖英琦 林学彤 王欣 张金英 李卓

Underwater ranging with intensity modulated 532nm laser source

Li Kun Yang Su-Hui Liao Ying-Qi Lin Xue-Tong Wang Xin Zhang Jin-Ying Li Zhuo

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 084203 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20201612

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201612>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

磁场对激光驱动Kelvin-Helmholtz不稳定性影响的二维数值研究

Two-dimensional numerical study of effect of magnetic field on laser-driven Kelvin-Helmholtz instability

物理学报. 2020, 69(24): 244701 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20201167>

基于1.06 μm 波长的空间合作目标及碎片高精度激光测距试验

1.06 μm wavelength based high accuracy satellite laser ranging and space debris detection

物理学报. 2020, 69(1): 019502 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191299>

高频共振预探测多脉冲激光测距方法

Multi-pulse laser ranging method for pre-detection with high frequency resonance

物理学报. 2018, 67(7): 074202 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172079>

光纤超声传感器及应用研究进展

Fiber-optic ultrasonic sensors and applications

物理学报. 2017, 66(7): 074205 <https://doi.org/10.7498/aps.66.074205>

一种基于单水听器的浅海水下声源被动测距方法

A passive range method of underwater source based on single hydrophone

物理学报. 2017, 66(18): 184301 <https://doi.org/10.7498/aps.66.184301>

奇异谱分析用于提升双光梳激光测距精度

Singular spectrum analysis for precision improvement in dual-comb laser ranging

物理学报. 2018, 67(1): 010601 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20171922>

强度调制 532 nm 激光水下测距*

李坤¹⁾²⁾³⁾ 杨苏辉^{1)2)†} 廖英琦¹⁾²⁾ 林学彤¹⁾²⁾王欣¹⁾²⁾ 张金英¹⁾²⁾ 李卓¹⁾²⁾

1) (北京理工大学光电学院, 北京 100081)

2) (精密光电测试仪器及技术北京市重点实验室, 北京 100081)

3) (昆明物理研究所, 昆明 650223)

(2020年9月29日收到; 2020年11月10日收到修改稿)

激光水下探测在水下目标搜寻、资源勘探等领域具有重要的应用, 而散射是激光水下探测面临的主要挑战. 载波调制激光雷达具有抗散射、抗干扰的优点, 本文利用自行研制的 532 nm 强度调制激光源, 在 3 m 长的水箱中搭建激光水下探测系统. 532 nm 激光源最大输出功率为 2.56 W, 强度调制范围为 10.0 MHz—2.1 GHz, 光束发散角约 0.5 mrad. 通过在水箱中添加氢氧化镁 ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) 粉末, 测量了不同浑浊度下水的衰减系数. 采用相位测距的方法, 目标反射光的调制信号为探测信号, 对激光源进行调制的电信号作为参考信号, 利用相关运算获得激光的延时时间, 进而可以获得水下目标的距离. 最大调制频率为 500 MHz 时, 实现了距离为 4.3 个衰减长度目标的探测, 测距误差约 12 cm. 探测距离越远, 测距误差越大, 调制频率越高, 测距精度越高.

关键词: 激光, 强度调制, 水下测距, 相关计算

PACS: 42.55.-f, 42.62.-b, 42.68.-w

DOI: 10.7498/aps.70.20201612

1 引言

水下激光雷达具有空间分辨率高、速度快、效率高和体积小等优点, 可以应用于舰载、机载, 在海洋资源勘探、近海地形测绘、水下目标搜寻等领域具有突出的优势^[1-4]. 水对激光的吸收和散射是水下激光雷达面临的重要挑战^[5]. 吸收会引起探测信号的衰减, 限制探测距离; 散射除了引起信号衰减外, 还会导致强烈的噪声, 甚至淹没目标信号. 蓝绿光波段是水体的透光窗口^[6], 选择蓝绿光作为工作波长可以有效地减少水对探测光的吸收. 载波调制技术是抑制水体后向散射的一种重要方法^[7-9]. 载波调制激光雷达是将激光雷达和微波雷达相结

合, 以射频强度调制激光为探测波, 具有较高的空间分辨率和抗湍流干扰能力. 载波调制激光雷达适用于近距离高精度的探测, 采用调制信号作为探测波, 通过提高调制信号的带宽可以获得更高的距离分辨率. 将发射波光强进行高频调制, 目标反射的光子可以保持其强度调制信息, 而在发射源与目标之间由不同距离处水体散射的光子之间会产生干涉相消, 导致高频调制信号消失^[10].

2011年, 电子科技大学张洪敏等^[11]对载波调制激光雷达水下目标探测系统进行了仿真, 仿真表明载波调制激光雷达技术对深海目标探测结果有明显改善, 海水参数和调制参数对探测性能有较大影响. 2014年, Illig等^[12]采用直接调制的方式, 获得了 50 mW 的 442 nm 调制激光, 调制频率 50—

* 国家自然科学基金 (批准号: 61835001, 61875011) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: suhuiyang@bit.edu.cn

550 MHz. 采用该激光源搭建水下目标探测系统, 采用光电倍增管作为探测器, 利用频域反射法获得了 10.2 个衰减长度的精确测量, 然后利用盲信号分离技术, 将探测距离提高到了 14.7 个衰减长度. 2016 年, 太原理工大学张明涛等^[13]采用混沌调制激光雷达进行水下测距, 在 1.5 m 长的水箱中实现了最大 1.36 m 的探测距离, 平均测距误差为 2.3 cm. 2020 年, 北京空间机电研究所的沈振民等对混沌脉冲激光雷达和相干双频脉冲激光雷达进行了理论分析, 分别在清水和浊水中测量了水箱中 51 cm 位置处的反射镜距离, 测距结果分别为 54.5 和 59.0 cm^[14]. 强度调制绿光激光是水下载波调制激光雷达的光源, 目前用于激光水下探测的啁啾强度调制光源多为几十毫瓦量级, 功率较低. 由于水对激光的衰减, 激光水下探测回波信号十分微弱, 给信号的采集和处理带来了难度.

本文采用马赫曾德尔电光调制器对单频 1064 nm 激光进行强度调制, 经过光纤功率放大器后倍频, 获得了 2.56 W 的强度调制绿光, 调制范围 10 MHz—2.1 GHz. 调制频率为 100 MHz 时, 调制深度为 0.91, 调制频率为 300 MHz 时频率误差约为 1.2 Hz@5 min. 利用设计的激光器作为探测源, 高速硅探测器作为接收器, 搭建水下目标探测系统. 通过在 3 m 长的水箱中添加氢氧化镁 ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) 粉末来改变水体的衰减系数, 采用 PIN 探测器实现了距离为 4.3 个衰减长度目标的探测, 测距误差约 12 cm. 由激光雷达方程知, 传输距离的平方与回波信号的功率成反比, PIN 探测器和光电倍增管的噪声等效功率分别约为 20 pW/Hz^{1/2} 和 0.01 pW/Hz^{1/2}, 原则上采用光电倍增管作为探测器探测距离可以提高 45 倍.

2 实验原理

2.1 相位测距原理

相位法测距是将调制信号加载到激光上, 通过测量发射激光的调制信号和回波激光的调制信号之间的相位差来获得测量目标的距离信息^[15].

发射激光的调制信号为

$$I_1 = A_1 \cos(2\pi f t_1 + \varphi_1), \quad (1)$$

式中, I_1 表示发射激光的调制信号强度; A_1 表示发射激光的调制信号幅值; f 为调制信号频率; t_1, φ_1

分别表示发射激光调制信号的初始时间和相位.

接收到的回波激光的调制信号为

$$I_2 = A_2 \cos(2\pi f t_2 + \varphi_2), \quad (2)$$

式中, I_2 表示回波激光的调制信号强度; A_2 表示回波激光的调制信号幅值; t_2, φ_2 分别表示回波激光调制信号的时间和相位.

接收端和发射端之间的相位偏移为

$$\Delta\varphi = 2\pi f(t_2 - t_1) + \varphi_2 - \varphi_1. \quad (3)$$

激光接收端和发射端之间的时间差为

$$\Delta t = t_2 - t_1 + \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2\pi f}. \quad (4)$$

目标的距离为

$$D = \frac{1}{2} v \Delta t = \frac{v}{2f} \left(N + \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2\pi} \right) = \frac{\lambda}{2n} \left(N + \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2\pi} \right), \quad (5)$$

式中, v 为发射激光在水中的传播速度; N 表示回波信号和发射信号之间相差的完整的波长数. 回波信号和发射信号之间的相位差只能计算出来单个周期的相位差. $\lambda/(2n)$ 为相位测距法的测尺长度; λ 为调制信号波长; n 为发射激光在水中的折射率. 当测量距离大于测尺长度的时候, 测距结果需要加上完整的波长个数 N .

对于相位法测距, 最大测量距离即为测尺长度, 因此采用单一测尺测距, 测量长度会有很大的局限性. 如果需要增大测量距离, 只能降低调制频率, 为了提高测量精度, 需要增大调制频率. 单个调制频率相位测距, 测量长度和测量精度无法同时满足, 因此通常采用多测尺法进行测量^[16–18]. 分散的多测尺法是根据测量距离选择一个较低的调制频率, 保证测尺的长度, 然后采用较高的调制频率提高测量精度. 根据低频调制可以确定高频调制的相位延时的完整波长数 N . 随着测量频率的提高, 测尺长度减小, 测量精度提高, 因此可以采用一组低频到高频的调制频率作为探测信号, 既可以测量较远的距离, 也可以保证测量精度. 集中的测尺法是采用两个集中的高频调制进行探测, 频率之间的差值作为测尺, 较高的调制频率保证测量精度, 也可以被称为双频测距^[19].

2.2 相关运算原理

载波调制激光雷达技术是利用目标及水体散射对调制信号不同的响应将信号与散射噪声分离,

提高信噪比. 强度调制激光在水中传输时, 由目标直接反射的光子可以保持其强度调制信息, 而散射光子由于传输路径复杂, 不同距离的散射光相互叠加导致高频调制信号的消失. 通过测量回波信号的相位延时可以得到目标的距离, 而相位测量的精度直接决定测距精度. 相关运算是利用相关函数进行数据分析的方法. 发射激光和接收激光的调制频率相同而具有相关性, 从而可以利用相关运算实现相位差的测量. 由于噪声信号与接收信号频率不同不具有相关性, 相关运算可以消除系统的随机噪声而提高信噪比^[20].

发射信号和接收信号的相关函数可以定义为^[21]

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t)y(t-\tau)dt, \quad (6)$$

式中, $x(t)$ 表示发射信号; $y(t-\tau)$ 表示回波信号; $R_{xy}(\tau)$ 为互相关函数. 由于发射信号和回波信号的频率相同, 只有一个固定的相位差, 则 $R_{xy}(\tau)$ 函数会有一个峰值出现. 利用互相关函数检测信号通常在信号已知的条件下进行, 将已知的波形和采集的波形在固定长度内进行相关运算, 当 $\tau = \tau_0$ 时, $x(t)$ 和 $y(t)$ 中的信号部分重合, $R_{xy}(\tau)$ 有最大值, 此时 τ_0 即为两个信号之间的时间差, 进而可以得到探测距离:

$$D = \frac{\lambda}{2n} N + \frac{v\tau_0}{2}. \quad (7)$$

3 实验系统

实验系统如图 1 所示, 532 nm 强度调制激光经过准直后入射到 3 m 长的水箱中, 准直光束直径约 1 mm, 发散角约 0.5 mrad. 水中目标为反射率约 0.8 的玻璃板, 反射信号被直径 1 in (1 in=2.54 cm)、焦距 50 mm 的透镜接收后聚焦到高速 PIN 探测器上. 探测器接收的回波信号和射频源发射的参考信号输入到示波器中.

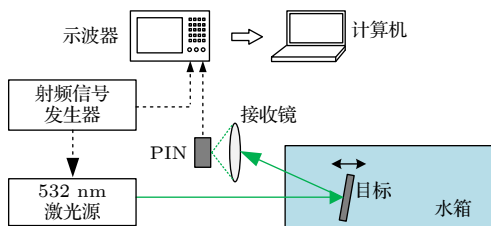


图 1 激光水下探测系统

Fig. 1. Experimental setup of underwater ranging.

将回波信号和参考信号做相关运算, 可以得到回波信号的延时时间, 进而得到目标的距离. 发射系统和接收系统是分离的, 间距约为 6 cm, 而且视场重叠较小, 因此接收系统接收到的回波信号中后向散射信号较少, 目标信号的信噪比较高, 容易实现浑浊水体中目标的探测.

4 实验结果与分析

4.1 水的衰减系数测量

光在水中的衰减遵循比尔-朗伯定律, 将水箱中的目标放置在 x_1 和 x_2 处, 则回波的强度分别为

$$I_1 = I_0 \alpha^2 \beta \exp(-c \cdot 2x_1), \quad (8)$$

$$I_2 = I_0 \alpha^2 \beta \exp(-c \cdot 2x_2), \quad (9)$$

式中, I_0 为入射光的光强; α 为水箱入射窗口的透过率; β 为目标的反射率; 则水的衰减系数 c 为

$$c = \frac{\ln(I_1/I_2)}{2(x_2 - x_1)}. \quad (10)$$

因此, 确定 x_1 和 x_2 之间的距离和两个位置处的回波信号功率即可得到水的衰减系数.

$Mg(OH)_2$ 粉末难溶于水, 通过在水中添加 $Mg(OH)_2$ 粉末可以改变水的衰减系数, 从而可以在不同的水体中测量目标的距离. 把水箱入射窗口的内表面作为距离零点, 不同水的衰减系数测量结果如表 1 所示. 由于实验室的自来水使用频率不高, 在水箱中呈黄绿色, 样本 1 为实验室的自来水静置 24 h 以上的水体. 采用源恒通 (WGZ-400AS) 浊度计, 量程 0—400 NTU, 精度 0.1 NTU, 静置前测量三次的平均浊度为 11.3 NTU, 静置后测量三次的平均浊度为 11.2 NTU, 水体比较稳定. 在样本 1 水体中分别测量 0, 0.5, 1.0 和 1.5 m 处回波激光的功率, 以 0 m 处为基准计算不同距离水的衰减系数分别为 0.98, 0.99 和 1.00 m^{-1} , 平均衰减系数为 0.99 m^{-1} .

在样本 1 中添加 $Mg(OH)_2$ 粉末, 打开水箱中的循环泵, 使 $Mg(OH)_2$ 粉末在水中充分扩散, 再次测量不同距离处水的衰减系数. 当添加 $Mg(OH)_2$ 颗粒较多, 水的衰减系数较大时, 目标距离较远的回波信号功率较低, 测量误差较大, 因此在较近的距离内测量回波激光的功率. 由于水箱中循环水泵的作用, 水中悬浮的 $Mg(OH)_2$ 颗粒充分均匀, 认为水箱中各处的衰减系数一致. 4 个水体样本的

平均衰减系数分别为 0.99, 1.72, 2.97 和 4.03 m^{-1} , 单位衰减长度对应的距离分别为 1.01, 0.58, 0.34 和 0.25 m.

表 1 不同水体的衰减系数

Table 1. Attenuation coefficient of different water.

样本	目标距离/m	回波信号强度/mW	衰减系数/ m^{-1}	平均衰减系数/ m^{-1}
1	0	160	—	0.99
	0.50	60	0.98	
	1.00	22	0.99	
	1.50	8	1.00	
2	0	261	—	1.72
	0.50	47	1.71	
	0.80	17	1.71	
	1.00	8	1.74	
3	0	216	—	2.97
	0.20	68	2.89	
	0.30	35	3.03	
	0.50	11	2.98	
4	0	230	—	4.03
	0.20	47	3.97	
	0.25	30	4.07	
	0.40	9	4.05	

4.2 相位法水下目标距离测量

采用示波器采集调制信号和回波信号的波形,同时对两个通道进行数据采集. 把水箱入射窗口的内表面作为距离零点, 水的衰减系数为 0.99 m^{-1} , 激光的调制频率为 50 MHz 时, 回波信号和参考信号的波形如图 2(a) 所示, 将回波信号和参考信号做相关运算, 结果如图 2(b) 所示, 峰值对应时间为 -0.48 ns . 把目标移动到水中 0.5 m 的位置, 回波信号和参考信号的波形如图 2(c) 所示, 将回波信号和参考信号做相关运算, 结果如图 2(d) 所示, 峰值对应时间为 4.158 ns. 水的折射率为 $1.333@532 \text{ nm}$, 调制频率为 50 MHz, 在水中的测尺长度为 2.251 m. 0.5 m 的距离在一个测尺之内, 则两个位置之间的延时时间为 4.638 ns, 距离为 0.522 m, 测距误差为 2.2 cm. 目标距离的标定为固定在水箱上精度为 1 mm 卷尺的测量结果, 因此测量误差为激光测距和卷尺测距之间的差值.

水的衰减系数为 0.99 m^{-1} , 分别把目标放置在 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 和 2.5 m 的位置, 采用相位法测距, 每个位置采集五组数据, 不同调制频率下的测距结果如图 3 所示. 调制频率分别为 50, 100, 200,

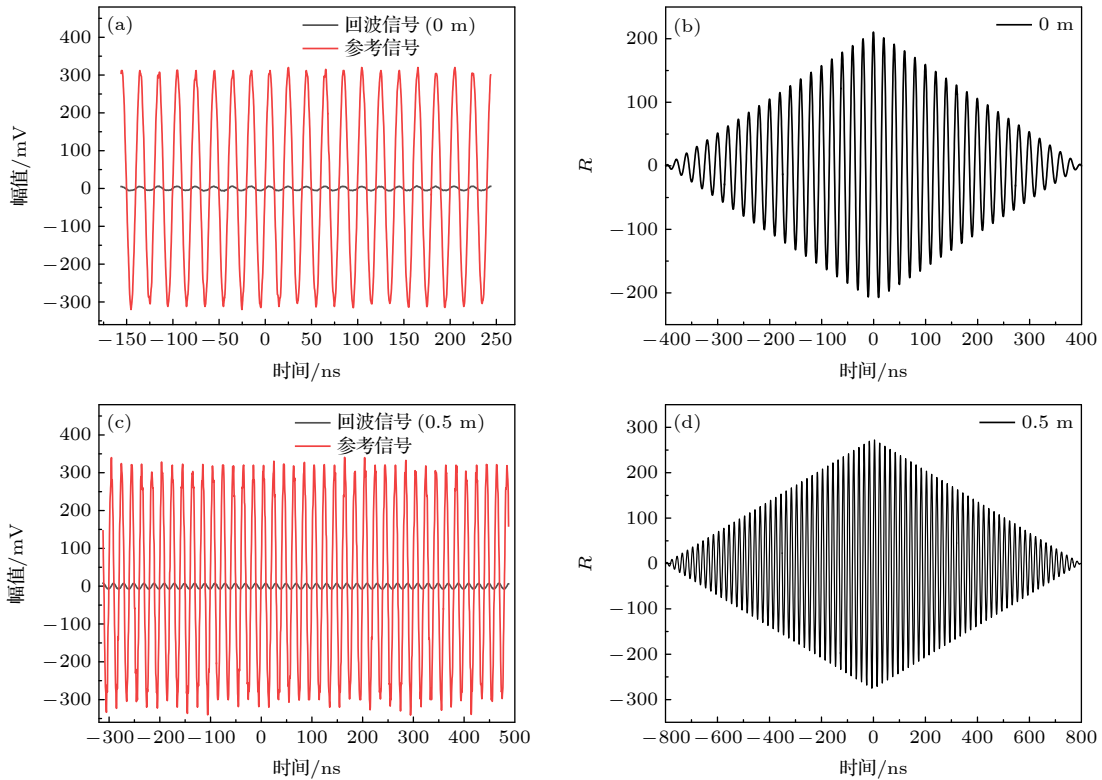


图 2 回波信号和参考信号的波形及相关运算结果 (a), (c) 0 和 0.5 m 处的波形; (b), (d) 0 和 0.5 m 处的相关结果

Fig. 2. Waveform of echo signal and reference signal, results of correlation calculation: (a), (c) Waveform at 0 and 0.5 m; (b), (d) results of correlation calculation at 0 and 0.5 m.

300, 400 和 500 MHz, 在水中对应的测尺长度约为 2.251, 1.125, 0.563, 0.375, 0.281 和 0.225 m. 调制频率为 50 MHz 的测尺基本可以覆盖水箱中的测量距离, 2.5 m 位置处的测量结果需要补全一个测尺长度. 调制频率增大, 测尺减小, 测尺长度小于测量长度时可以根据调制频率为 50 MHz 的测距结果补全相应倍数的测尺长度. 图 3(f) 为不同距离不同调制频率的测距误差, 随着测量距离的增大, 测量误差增大, 最高达到了 7.45 cm. 同一距离, 调制频率越高, 测距误差越小.

水的衰减系数为 1.72 m^{-1} , 调制频率分别为 50, 100, 200, 300, 400 和 500 MHz, 采用相位法测

量不同位置的测尺长度, 测距结果如图 4(a)—(e) 所示. 当测量距离较近时同一调制频率同一目标的多次测量结果一致性较好. 如图 4(e) 所示, 多次测量结果比较分散, 与图 3(e) 相比, 水的浑浊度提高, 测距结果波动增大; 与图 4(a)—(d) 相比, 测量距离增大, 测距结果波动增大. 图 4(f) 表明了不同距离不同调制频率的测距结果, 随着测量距离的增大, 测量误差也增大, 最高达到了约 12 cm. 由于水的浑浊度增加, 测距误差整体增大. 目标距离为 2.5 m 时, 调制频率为 500 MHz 的测距误差明显小于低频调制时的测距误差, 调制频率越高, 测距精度越高.

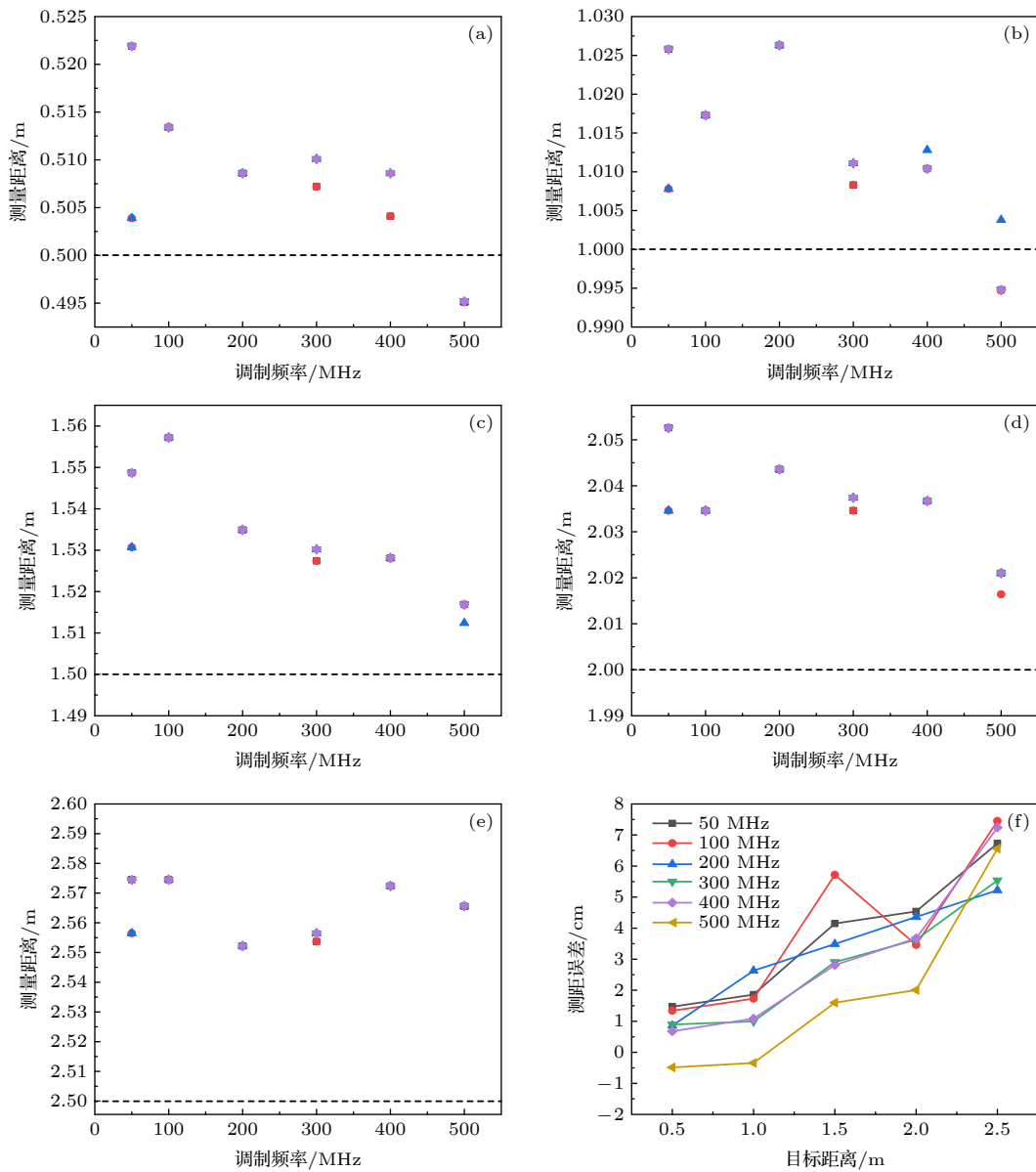


图 3 不同距离的测距结果及误差 ($c = 0.99 \text{ m}^{-1}$) (a) 0.5 m; (b) 1.0 m; (c) 1.5 m; (d) 2.0 m; (e) 2.5 m; (f) 测距误差

Fig. 3. Ranging results and errors at different distances ($c = 0.99 \text{ m}^{-1}$): (a) 0.5 m; (b) 1.0 m; (c) 1.5 m; (d) 2.0 m; (e) 2.5 m; (f) ranging error.

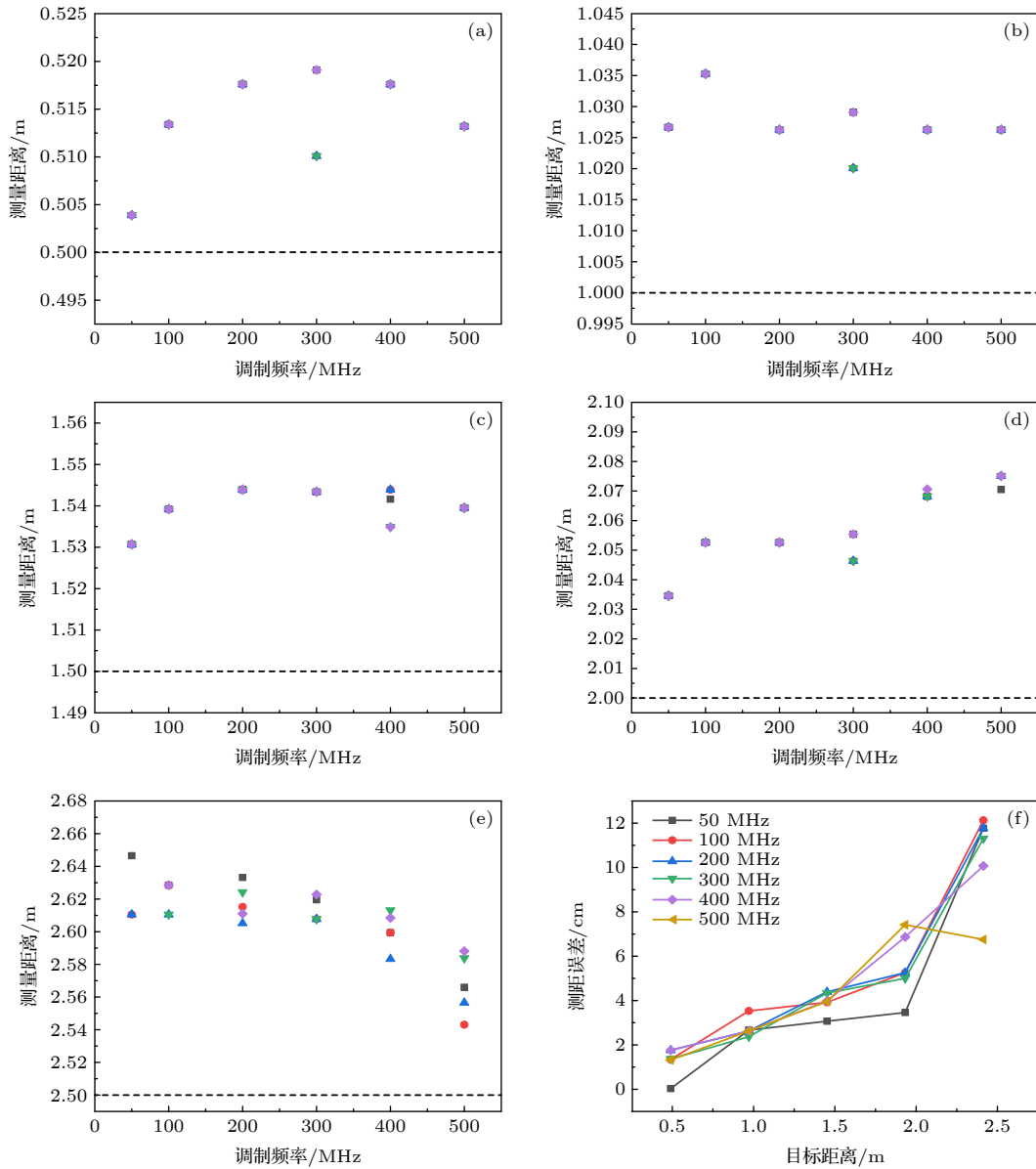


图 4 不同距离的测距结果及误差 ($c = 1.72 \text{ m}^{-1}$) (a) 0.5 m; (b) 1.0 m; (c) 1.5 m; (d) 2.0 m; (e) 2.5 m; (f) 测距误差

Fig. 4. Ranging results and errors at different distances ($c = 1.72 \text{ m}^{-1}$): (a) 0.5 m; (b) 1.0 m; (c) 1.5 m; (d) 2.0 m; (e) 2.5 m; (f) ranging error.

相位测距的整体测量结果如图 5 所示, 目标最大距离为 4.3 个衰减长度 (a.l.) 时, 测距结果约为 4.5 个衰减长度. 随着测量距离的增加, 测距误差增大, 测量结果向远处偏移. 水的浑浊度增加, 探测距离增大, 探测系统接收到的噪声信号越多, 信噪比降低, 从而导致了测距误差增大. 通过在接收端加一个以调制频率为中心的窄带滤波器可以进一步分离散射信号, 提高信噪比. 探测源的调制频率为 10.0 MHz—2.1 GHz, 因此通过继续提高探测激光的调制频率可以进一步提高测量精度, 实现近距离内高精度的测量.

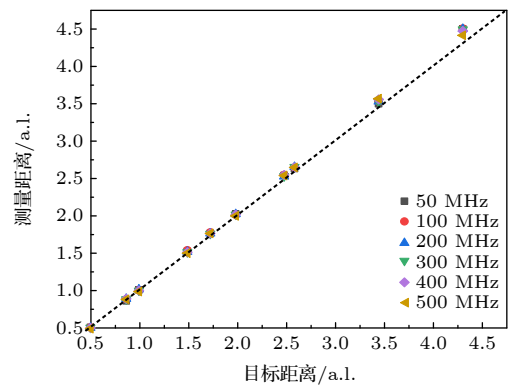


图 5 相位法测距结果

Fig. 5. Ranging results based on phase.

5 结 论

载波调制激光雷达可以有效抑制散射和湍流的影响, 本文采用自行研制的 532 nm 强度调制激光光源在 3 m 长的水箱中搭建激光水下探测系统, 测量了添加不同 $Mg(OH)_2$ 水体的衰减系数. 采用相位测距的方法, 分别在 50, 100, 200, 300, 400 和 500 MHz 的调制频率对不同距离的目标测距. 利用相关运算获得相位延时时间, 实现了 4.3 个衰减长度目标的测量, 测距误差约 12 cm. 探测距离越远, 误差越大, 调制频率越高, 测距精度越高. 水的衰减系数大, 目标的探测距离较远时, 回波信号的功率微弱, 会被淹没在噪声中. 采用 PMT 作为接收器, 可以实现微弱信号的探测, 提高测量距离. 采用高频的数据采集卡采集数据, 提高探测信号的调制频率, 可以进一步提高测量精度.

参考文献

- [1] Jaffe J S 2015 *IEEE J. Oceanic Eng.* **40** 683
- [2] Busck J 2005 *Opt. Eng.* **44** 16001
- [3] Austin J, William J, Alan L, Linda M, Brandon C 2018 *Opt. Express* **26** 2668
- [4] Laux A, Mullen L, Perez P, Zege E 2012 *Proceedings of SPIE on Ocean Sensing and Monitoring* Baltimore, USA, April 23, 2012 p8372
- [5] Haltrin V I 1998 *Appl. Opt.* **37** 3773
- [6] Duntley S Q 1963 *J. Opt. Soc. Am.* **53** 214
- [7] Mullen L J, Contarino V M 2002 *IEEE Microwave Mag.* **1** 42
- [8] Illig D W, Rumbaugh L, Jemison W D, Alan L, Linda M 2014 *Proceedings of IEEE International Conference on Oceans IV St. John's, Canada, September 14–19, 2014* p7003086
- [9] O'Connor S, Lee R, Mullen L, Cochenour B 2014 *Proceedings of SPIE on Ocean Sensing and Monitoring VI* Baltimore, USA, May 6–7, 2014 p91110P
- [10] Illig D W, Laux A, Lee R W, Jemison W D, Mullen L J 2015 *Proceedings of SPIE on Ocean Sensing and Monitoring VII* Baltimore, USA, April 20–24, 2015 p94590B
- [11] Zhang H M, Rong J, Li T, Tian L, Tang L, Liang G D 2011 *Infrared Laser Eng.* **40** 2408 (in Chinese) [张洪敏, 荣健, 李涛, 田磊, 汤林, 梁国栋 2011 *红外与激光工程* **40** 2408]
- [12] Illig D W, Jemison W D, Lee R W, Lauxb A, Mullen L 2014 *Proceedings of SPIE on Ocean Sensing and Monitoring VI* Baltimore, USA, May 6–7, 2014 p91110R
- [13] Zhang M T, Zhang J Z, Zhang J G, Xu H, Zhang M J, Wang A B, Wang Y C 2016 *Laser Optoelect. Prog.* **53** 051402 (in Chinese) [张明涛, 张建忠, 张建国, 徐航, 张明江, 王安帮, 王云才 2016 *激光与光电子学进展* **53** 051402]
- [14] Shen Z M, Shang W D, Wang B J, Zhao T, Zhang H Y, Zheng Y C, Zhou G Y 2020 *Acta Photonica Sin.* **49** 0601001 (in Chinese) [沈振民, 尚卫东, 王冰洁, 赵彤, 张海洋, 郑永超, 周国清 2020 *光子学报* **49** 0601001]
- [15] Dai Y J 2010 *Lidar Technology* (Vol. 2) (Beijing: Electronic Industry Press) pp586–588 (in Chinese) [戴永江 2010 *激光雷达技术* (下册) (北京: 电子工业出版社) 第586–588页]
- [16] Song H, Zhang Y F, Wu C P, S Y C, Wu C F, Guo Y L, Huang H, Si Y L, Yang P, Quan X Q 2019 *Infrared Laser Eng.* **48** 0406008 (in Chinese) [宋宏, 张云菲, 吴超鹏, 申屠溢醇, 吴超钊, 郭乙陆, 黄慧, 司玉林, 杨萍, 全向前 2019 *红外与激光工程* **48** 0406008]
- [17] Liu M, Yang X Y, Liu C J 2012 *Chin. J. Las.* **39** 0208004 (in Chinese) [刘邈, 杨学友, 刘常杰 2012 *中国激光* **39** 0208004]
- [18] Jiang C H, Yang J H, Zhang L J, Wang X K 2014 *Acta Photonica Sin.* **43** 0912006 (in Chinese) [姜成昊, 杨进华, 张丽娟, 王晓坤 2014 *光子学报* **43** 0912006]
- [19] Shangguan M J, Xia H Y, Wang C, Qiu J W, Lin S F, Dou X K, Zhang Q, Pan J W 2017 *Opt. Lett.* **42** 3541
- [20] Zhang Z Y, Sui X L 2002 *Chin. J. Las.* **29** 661 (in Chinese) [章正宇, 眭晓林 2002 *中国激光* **29** 661]
- [21] Liu Y, Lv Y D, Sun Z C, Zhang N, Fu Q Y 2019 *J. Telemetry Tracking Command* **40** 56 (in Chinese) [刘颖, 吕彦东, 孙志成, 张娜 付庆勇 2019 *遥测遥控* **40** 56]

Underwater ranging with intensity modulated 532 nm laser source*

Li Kun¹⁾²⁾³⁾ Yang Su-Hui^{1)2)†} Liao Ying-Qi¹⁾²⁾ Lin Xue-Tong¹⁾²⁾
Wang Xin¹⁾²⁾ Zhang Jin-Ying¹⁾²⁾ Li Zhuo¹⁾²⁾

1) (*School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China*)

2) (*Beijing Key Laboratory for Precision Optoelectronics Measurement Instrument and Technology, Beijing 100081, China*)

3) (*Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China*)

(Received 29 September 2020; revised manuscript received 10 November 2020)

Abstract

Laser underwater detection has important applications in underwater target search, resource exploration, and other fields. The absorption and scattering of light by water are a big challenge to underwater detection. Absorption causes the laser signal to attenuate, thus limiting the detection distance. Scattering causes not only attenuation but also noise, the strong scattering noise can even submerge the target information. To reduce the absorption, the blue-green light band in the transmission window of water is chosen for lidar. Optically carried microwave radar (OCMR) has the advantages of resistance to turbulence and scattering. The intensity of the detection beam is modulated at radio frequency. The photons reflected by the target retain the intensity modulation information, while interference phase-out is generated between photons scattered by particles suspending in turbid water at different distances, resulting in the average of high-frequency modulation signals. The signal-to-noise ratio is improved when the received signal by the detector is correlated with the modulation signal.

High-power broadband intensity modulated light source is the key to achieving the long-distance, high-precision underwater ranging with the carrier modulation method. However, the carrier modulation technology for underwater detection is limited by the development of light source. The maximum power of intensity modulation green light used in underwater detection is on the order of hundreds of milliwatts, the receiver needs to adopt a photomultiplier tube (PMT).

In this paper, a laser underwater detection system is built with a 3-m-long water tank by using a home-made 532 nm light source. The maximum output power of the intensity-modulated 532 nm laser is 2.56 W. The modulation frequency is turned from 10 MHz to 2.1 GHz. Water with different attenuation coefficients is obtained by adding $\text{Mg}(\text{OH})_2$ into the water tank. When the maximum modulation frequency is 500 MHz by phase ranging, 4.3 attenuation lengths(a.l.) are measured. The ranging error is about 12 cm. In the future study, a PMT will be used as the detector to increase the range resolution. We will also increase the bandwidth of the signal processing unit in order to take full advantage of the broadband intensity to modulate light source.

Keywords: laser, intensity modulation, underwater ranging, correlation calculation

PACS: 42.55.-f, 42.62.-b, 42.68.-w

DOI: 10.7498/aps.70.20201612

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61835001, 61875011).

† Corresponding author. E-mail: suhuiyang@bit.edu.cn