

基于频域能量检测器的脉冲激光声信号检测

王伟^{1*}, 杨依光¹, 张卫红¹, 李绪锦¹, 徐德刚²

¹青岛海洋科学与技术试点国家实验室, 山东 青岛 266200;

²天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072

摘要 结合实测的激光致声信号时频域特性, 提出了一种基于频域能量检测器的新型水下脉冲激光声信号检测方法, 并分析了不同频率激光声信号的衰减特性。针对远距离条件下高频信号衰减严重的问题, 在频域能量检测器的前端添加了预补偿滤波器。蒙特卡罗仿真结果表明, 带预补偿滤波器的频域能量检测器可以有效提高远距离下激光声信号的检测性能。

关键词 激光声; 信号检测; 频域能量检测; 水声通信

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0701008

Pulsed-Laser-Sound-Signal Detection Based on Frequency-Domain Energy Detector

Wang Wei^{1*}, Yang Yiguang¹, Zhang Weihong¹, Li Xujin¹, Xu Degang²

¹Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao, Shandong 266200, China;

²Tianjin University, school of Precision Instruments & Opto-Electronics Engineering, Tianjin 300072, China

Abstract An underwater pulsed-laser-sound-signal detection technique is introduced by combining the frequency-domain characteristics of the laser acoustic signal. The different attenuation characteristics of the laser acoustic signal at different frequencies are analyzed. To ameliorate the serious attenuation of high frequency components at long distances, a pre-compensation filter is added to the front end of the frequency-domain energy detector; the results of Monto-Carlo simulation show that the frequency domain energy detector with pre-compensation filter can effectively improve the detection performance of laser acoustic signal at a long distance.

Key words laser-sound; signal detection; energy-detection in frequency-domain; underwater acoustic communication

OCIS codes 070.1060; 070.4790; 070.7345

1 引言

近年来,海洋的战略地位愈发重要,水下目标的快速探测、精确识别以及空中对水下目标的通信是现代国防与海洋工程领域的研究热点之一。激光在海上应用中已经发挥了重要作用,如采用机载激光雷达,借助蓝绿激光的穿透窗口^[1]实现海上遥感、水深测量、地形勘探等^[2-3]。由于激光在海水中会产生强烈衰减,机载激光雷达探测很难覆盖整个海深。“激光声”探测通信技术利用激光直接或者间接产生宽带、窄脉冲、高强度的声波,在水下利用声波传递信息,其结合激光与声波的优点在水下遥感、通信、

探测等领域都有巨大的应用潜力。

激光致声的研究范畴属于光声领域,光声效应的发现最早可以追溯到 19 世纪 80 年代。随着激光技术的发展,光声的相关研究开始蓬勃发展,20 世纪 60 年代,美国科学家 White 和苏联科学家 Prokhorov 分别发现强激光脉冲可以在浓缩的液体介质中通过光声效应激发出声波^[4]。1996 年,美国研究所在提交的激光相关的专利中已经包含了关于如何用强激光光束聚焦,在焦点区域作为脉冲激光声源的方法,在实验上达到了 0.1 MPa 的声压级。随着技术的不断发展,各国科学家开始利用激光声信号进行通信探测,展开了实验研究,其中较有代表

收稿日期: 2018-11-28; 修回日期: 2019-01-07; 录用日期: 2019-01-23

* E-mail: wwang@qnlm.ac

性的是俄罗斯声学研究所的 Egerev 教授^[5],其首先在黑海验证了利用激光声信号在浅海对远程海底目标进行传感的可行性,随后利用高强度光脉冲在海洋表面产生的声波来实现对水下深海设备的远程控制。此外,Blackman 教授在空中利用两台独立的激光设备成功实现非接触式的水下目标探测^[6]。

虽然激光声探测通信已经应用于海洋探测装备技术领域,但是仍然需要继续探索光致声的机理,并突破现有的探测技术,为此,国内外的研究学者展开了研究。高功率脉冲激光聚焦击穿透明液体时,会产生冲击波,冲击波衰减后变为声波。根据声波形成的原理可以将其分为激光等离子体膨胀引起的声波和激光空泡溃灭引起的声波,两者统称为激光致声信号^[7]。在对激光致声信号的产生机理、频谱特性及后续实验应用的探索中,Blackmon 等^[8-11]对激光击穿效应下产生的信号波形及频谱特征进行了分析,并对基于激光致声信号的通信进行了深入的研究和探索。王雨虹等^[12]分析了激光能量与激光声特性之间的关系。宗思光等^[13]对激光的水下探测性能进行了研究。王晓宇等^[14]对激光致声信号的频谱等特征进行了分析,并以激光致声信号作为通信源进行了尝试。邓圆等^[15-16]对激光致声信号的产生机理进行了系统分析,并分析了激光脉冲在介质中的传播特性。相对于传统的水下声源,激光产生的声信号具有脉冲窄、频谱宽、声源级高、距离方位分辨能力强、无需与声传播的介质直接接触等特点^[17],使得激光声信号在水下遥感、通信、探测等领域都有巨大的应用潜力。

脉冲激光器产生脉冲的间隔较长、脉冲持续时间短,所产生的声信号很难叠加,信号时频域的控制性不强。在采用单脉冲激光器进行水下遥感、通信时,通常采用二进制启闭键控(OOK)、振幅键控(ASK)、频移键控(FSK)等调制效率较低的通信方式^[14]。对于以上通信方式,信号有无的检测是决定通信质量的关键因素。在信号检测方法中,最常用的检测方法包括匹配滤波算法、能量检测算法、循环平稳特征提取算法等^[18]。其中,匹配滤波算法需要提前知道信号的发射波形信息,在声信号远距离传输条件下,水声信道对不同频率信号的衰减使得信号的波形发生变化,导致匹配滤波器的匹配性能下降。循环平稳特征提取算法需要运用高强度的快速傅里叶变换(FFT)运算,实现的复杂度较高^[19]。而能量检测算法是在高斯噪声背景下应用最广泛的检测方法之一,对于激光声信号的检测,激光声信号的

脉冲持续时间短、采样点数少,利用 FFT 算法实现的能量检测器运算量小、运算速度快,适用于脉冲激光声信号的检测和判断。

水声信道对不同频率信号的衰减特性不同,衰减系数大致与频率的平方成正比,因此信号频率越高,信号衰减系数越大^[20]。激光致声信号的中心频点一般在高频处,通常在几十千赫兹到几百千赫兹,甚至上兆赫兹范围内。同时,激光声信号频谱范围虽然较宽,但能量相对集中,主值频率集中于中心频率处的一定带宽内。激光致声信号的这些特性及水声信道对不同频率传输特性的影响,使得频域能量检测器在低信噪比(SNR)条件下的检测误码率升高,性能下降。

国内外对激光致声信号的研究主要集中于激光致声信号的频谱、传播方向、信号在通信领域中的应用等,而对激光致声信号在水声信道中的传播及信号的探测研究较少。本文根据激光致声信号的特征,提出一种基于频域能量检测的激光致声信号检测方法,并结合水声信道的特点,在频域能量检测器之前添加了补偿滤波器,有效提高了系统检测的性能。

2 脉冲激光声信号传播特性分析

大能量激光脉冲在水中产生声波的过程涉及到介质的热膨胀机制、汽化机制和光击穿机制。在大能量激光脉冲致声过程中,汽化机制和光击穿机制占主导地位,这主要是因为在这两种机制下,光声能量转化效率较高^[14]。国内外学者针对不同的作用机理,在大量理论和实验研究的情况下,给出了不同的时频域信号表达形式。

2.1 单脉冲激光汽化机制致声信号波形表达式

对于脉冲激光,单脉冲汽化机制产生的声波为宽带 N 型脉冲^[15-16],声信号的脉冲形状与观测角度、观测距离、时间相关,其表达式为

$$P(\theta, r, t) = \frac{a^2 \cos \theta P_0 \tau}{\pi r c (\tau^2 + \tau_a^2 \sin^2 \theta + 4br)^{1/2}} \cdot \frac{\partial}{\partial t} \exp \left[\frac{-(t - r/c)^2}{\tau^2 + \tau_a^2 \sin^2 \theta + 4br} \right], \quad (1)$$

式中: θ 表示观测点与界面法线之间的夹角; r 表示观测点与激光作用到水面的初始点之间的距离; t 为时间; a 为激光的光斑半径; τ 为激光脉冲宽度; c 为水中的声速;参数 $\tau_a = a/c$; b 为水介质的吸收系数, $b = 6 \times 10^{-17} \text{ s}^2/\text{cm}$; P_0 为反作用引起的介质表面峰值压力,其估算公式为

$$P_0 = 0.6 \times I_0^{2/3}, \quad (2)$$

其中 I_0 为激光脉冲峰值功率密度。

当 $4br \gg \tau^2 + \tau_a^2 \sin^2 \theta$ 时,声波的波形不再由激光激发条件决定,此时的时域表达式为

$$P(\theta, r, t) = \frac{a^2 \cos \theta P_0 \tau}{\sqrt{\pi b} (2r)^{3/2} c} \frac{\partial}{\partial t} \exp \left[-\frac{(t - r/c)^2}{4br} \right]. \quad (3)$$

激光致声信号的波形及相关的频谱可以通过选择合适的激光调制方式、激光重复周期、激光波长、激光聚焦点等参数来控制^[8-11]。当激光脉冲的重复周期延长时,其时域数学模型是由 Blackmon 等^[21] 经过大量的实验总结建立。时域的表达式为

$$P(t) = P_m \exp \left(-\frac{t}{\lambda} \right) u(t) + \sum_j P_{Bj} \exp \left(-\frac{t - T_{Bj}}{\lambda_{Bj}} \right) u(t - T_{Bj}), \quad (4)$$

式中: P_m 表示激光等离子体声波峰值声压; λ 表示激光等离子体声波的衰减系数; $u(t)$ 表示阶跃函数; P_{Bj} 表示激光空泡第 j 次溃灭时辐射声波的峰值声压; λ_{Bj} 表示激光空泡第 j 次溃灭时辐射声波的衰减系数; T_{Bj} 表示激光等离子体声波和激光空泡第 j 次溃灭时辐射声波的时间间隔。

对(4)式进行傅里叶变换,可以得到激光声信号的幅频响应,即

$$\left| P(f) \right| = \left| \frac{P_m \lambda}{1 + j2\pi f \lambda} + \sum_j \frac{P_{Bj} \lambda_{Bj}}{1 + j2\pi f \lambda_{Bj}} \exp(-j2\pi f T_{Bj}) \right|, \quad (5)$$

式中: j 表示虚数单位; f 表示声波频率,且当 $f = n/T_R$ 时,函数取得最大值; T_R 表示激光器的频率重复周期,可以通过改变信号的重复周期,在指定的频

率处产生需要的信号。

2.2 水声信道中的声吸收

声波信号在海水介质中传播时,声能逐渐转变为热能,成为吸收损失。吸收损失与海水成分、温度、压力、声波的频率及传播方式有关^[22]。实际应用中常采用 Francais-Garriso 经验公式来计算声吸收系数^[23]。总吸收系数为硼酸贡献、硫酸镁贡献和纯水贡献之和,即

$$\alpha = \frac{A_1 P_1 f_1 f^2}{f^2 + f_1^2} + \frac{A_2 P_2 f_2 f^2}{f^2 + f_2^2} + A_3 P_3 f^2, \quad (6)$$

式中: α 为声吸收系数,单位为 dB/km; f 为声波频率,单位为 kHz。

硼酸贡献对应的系数为

$$\begin{cases} A_1 = \frac{8.86}{c} \times 10^{0.78\text{pH}-5} \\ P_1 = 1 \\ f_1 = 2.8(S/35)^{0.5} 10^{(4-1245/T)} \end{cases}, \quad (7)$$

式中: pH 为海水的 pH 值; T 为海水的开尔文温度; S 为海水中全部溶解固体与海水质量之比(以下简称“盐度”)。根据 $c = 1412 + 3.21 \times T_C + 1.19 \times S + 0.0167 \times D$ 估算得到声速,单位为 m/s,其中, T_C 表示摄氏温度($^\circ\text{C}$), D 表示深度(m)。

硫酸镁贡献对应的系数为

$$\begin{cases} A_2 = 21.44 \times \frac{S}{c} \times (1 + 0.26 \times T_C) \\ P_2 = 1 - 1.37 \times 10^{-4} D + 6.2 \times 10^{-9} D^2 \\ f_2 = \frac{8.17 \times 10^{8-1990/T_K}}{1 + 0.0018(S - 35)} \end{cases}. \quad (8)$$

式中: T_K 表示热力学温度(K), $T_K = 273 \text{ }^\circ\text{C} + T_C$;

纯水贡献对应的系数为

$$\begin{cases} A_3 = 4.937 \times 10^{-4} - 2.59 \times 10^{-5} T_C + 9.11 \times 10^{-7} T_C^2 - 1.50 \times 10^{-8} T_C^3, T_C \leq 20 \text{ }^\circ\text{C} \\ A_3 = 3.964 \times 10^{-4} - 1.146 \times 10^{-5} T_C + 1.45 \times 10^{-7} T_C^2 - 6.5 \times 10^{-10} T_C^3, T_C > 20 \text{ }^\circ\text{C} \\ P_3 = 1 - 3.83 \times 10^{-5} D + 4.9 \times 10^{-10} D^2 \end{cases}. \quad (9)$$

3 脉冲激光声信号仿真分析

3.1 激光脉冲声信号采集实验设计

激光脉冲声信号产生及采集实验装置如图 1 所示。实验采用调 Q Nd:YAG 脉冲激光器产生激光声源信号。实验采用的激光波长为 1064 nm,脉冲宽度为 68 ns,重复频率为 110 Hz。激光光束经棱镜转向后,经凹透镜扩束,再通过凸透镜形成平行

光,最后经过消像差非球面凸透镜聚焦。采用水听器接收所产生的激光信号,其中水听器的线性频率接收范围为 1 Hz ~ 250 kHz,接收灵敏度为 -218 dB(1 V/ μPa)。实验中采用信号采集器将信号进行模数转换,采样频率为 500 kHz。

3.2 激光脉冲声信号波形分析

在大能量激光致声过程中,光击穿和汽化机制占据主导地位^[18],可以根据(1)~(4)式对激光参数

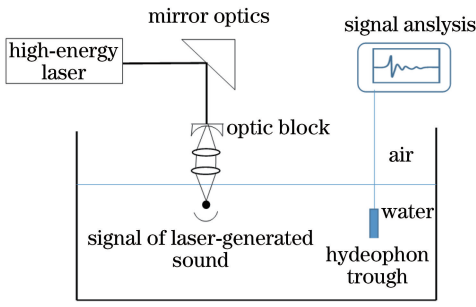


图 1 激光脉冲声信号产生及采集实验装置图

Fig. 1 Experimental setup diagram of generation and collection of laser acoustic signal

发生变化时的激光声波形进行仿真。实验过程中调

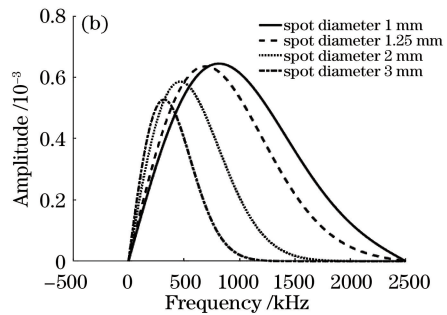
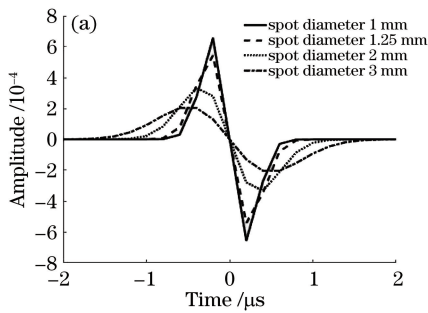


图 2 不同激光器光斑面积下的时频域波形图。(a)时域波形图；(b)频域波形图

Fig. 2 Time-domain and frequency-domain waveforms under different spot diameters.

(a) Time-domain waveform; (b) frequency-domain waveform

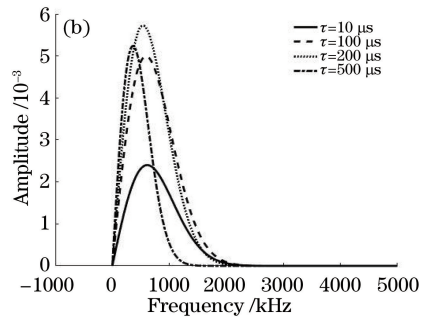
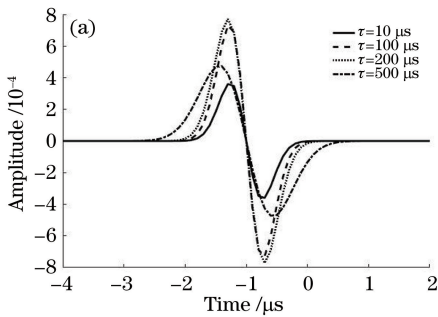


图 3 不同激光器脉冲宽度下的时频域波形图。(a)时域波形图；(b)频域波形图

Fig. 3 Time-domain and frequency-domain waveforms under different laser pulse widths.

(a) Time-domain waveform; (b) frequency-domain waveform

利用图 1 所示的实验装置,设置光斑的直径为 1.25 mm,激光脉冲宽度为 8 ns 时,时域波形的持续时间约为 100 μ s。不同时域点的激光声信号如图 4(a)所示。当激光器的脉冲能量不同时,信号幅值将发生变化,不同能量作用下信号的功率谱密度曲线如图 4(b)所示。

从图 4(a)可以看出,不同时间点下采集的时域信号持续时间相同,波形相似。从图 4(b)可以看出,激光声信号幅值虽然存在差异,但频谱特性相似,信号能量集中在 0~150 kHz 范围内。根据信

号能量将信号划分为 3 个不同的频带:频带 1(低频段)的频率范围为 0~50 kHz,频带 2(中频段)的频率范围为 50~100 kHz,频带 3(高频段)的频率范围为 100~150 kHz。各频带内能量占比的统计结果如表 1 所示。

为了分析在不同激光脉冲能量下激光致声信号的稳定性,对不同脉冲能量激光产生的声信号的功率谱密度进行分析。分析得到的结果如图 5 所示,同样对各频带内能量占比进行统计,统计结果如表 2 所示。

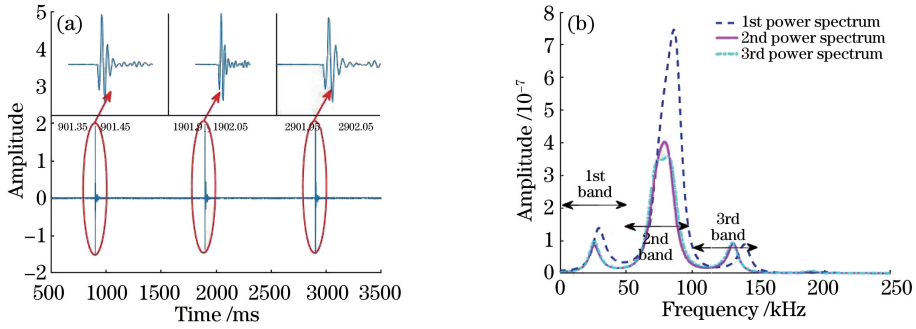


图 4 不同时间点的激光声时域波形及功率谱。(a)时域波形图;(b)功率谱

Fig. 4 Time-domain waveform and power spectrum of laser-sound at different time.

(a) Time-domain waveform; (b) power spectrum

表 1 不同时间点的信号能量统计表

Table 1 Statistical results of signal power under different time

No. of frequency band	Power percentage / %		
	901 ms	1901 ms	2901 ms
Frequency band 1 (0-50 kHz)	12.26	12.02	11.96
Frequency band 2 (50-100 kHz)	77.01	73.53	73.02
Frequency band 3 (100-150 kHz)	9.79	13.29	13.61
Total power percentage	99.06	98.84	98.59

表 2 不同激光能量下激光声信号能量统计表

Table 2 Statistical results of laser-sound signal power with different laser powers

No. of frequency band	Power percentage / %				
	50 mJ	100 mJ	120 mJ	180 mJ	320 mJ
Frequency band 1 (0-50 kHz)	10.41	10.68	10.42	8.85	8.44
Frequency band 2 (50-100 kHz)	85.06	84.97	85.29	87.17	86.69
Frequency band 3 (100-150 kHz)	4.29	3.92	3.97	3.70	4.62
Total power percentage	99.76	99.57	99.68	99.72	99.75

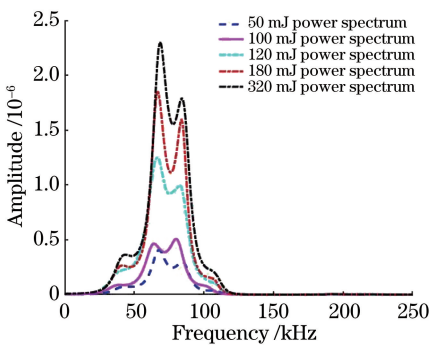


图 5 不同激光能量下激光声信号的功率谱

Fig. 5 Power spectrum of laser-sound signal with different laser energies

从图 4 及表 1 的统计结果可以看出,激光声信号在不同时域点的能量占比具有良好的稳定性,时域波形具有较好的重复性。从图 5 及表 2 的统计结果可以看出,不同脉冲能量产生的激光声信号能量占比同样具有良好的稳定性。3 个频带的能量集中了 98% 以上的激光声信号能量,且第 2 频带内的能

量占激光声信号能量的 70% 以上,所以采用频域能量检测器对信号进行检测时,为了减少运算量,可将第 2 频带内的能量作为主要检测对象。

3.3 激光脉冲声信号传播特性分析

(6)式适用于 200 Hz~1 MHz 频率范围内信号吸收系数的计算,在此范围内的吸收系数精度可以达到 5%^[23]。根据(6)式,设定 pH 值为 8.0,水温为 15 °C,盐度为 3.5%,水深为 20 m 时,得到的 0~250 kHz 范围内水声信道对不同频率的衰减系数如图 6 所示,可以看出,衰减系数随着频率的升高而逐渐加大,衰减系数的数值与频率的平方成正比。

在以上分析的基础上,可以通过对声线传播路径的计算,仿真得到特定距离下的信号接收信噪比。由于激光致声信号的声场方向角较大,垂直于光传播方向的信号幅度最大,宽度最小,重复性最好^[24],在仿真中选择波束开角为 80°,声源的中心频率设定为 100 kHz,声源发射深度为 1 m,最大的接收距

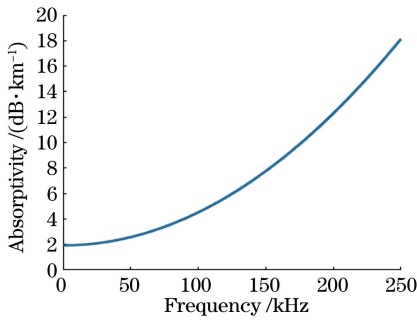


图 6 不同频率下水声信道的吸收系数

Fig. 6 Absorptivity in underwater acoustic channel at different frequencies

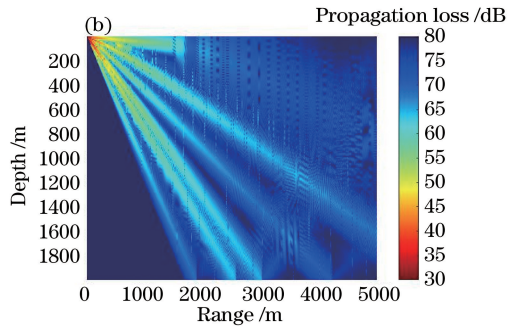
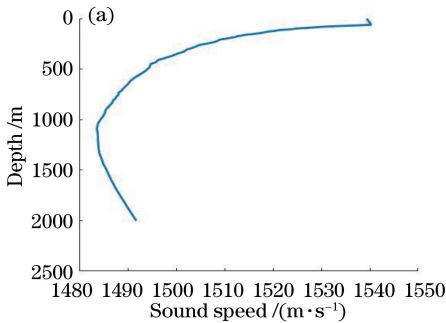


图 7 激光声信号在 HM2000 0370ARGO 浮标声速梯度下的仿真结果。

(a) HM2000 0370ARGO 浮标声速梯度图; (b) 激光声信号三维传播损失图

Fig. 7 Simulation results of laser-sound signal under sound velocity gradient generated by HM2000 0370 ARGO buoy.

(a) Sound velocity gradient generated by HM2000 0370 ARGO buoy; (b) three-dimensional propagation loss of laser-sound signal

3.4 频域能量检测器

水声信道对不同频率信号的衰减特性可以看作一个低通滤波器,滤波器的系数与传播距离和频率有关,激光致声信号经过水声信道时,相当于通过了一个低通滤波器。采用实际测量得到的激光致声信号对不同的频率按照衰减系数进行衰减,在不同距离处得到信号变换后的波形,如图 8 所示。可以看出,随着传播距离的增加,信号的能量逐渐衰减,特别是 50~150 kHz 内的信号,由于衰减系数较大,

传播信号的能量随着距离的增加,衰减更快。

水声信道噪声谱级与频率呈反比,高频段的噪声谱级低于低频段的噪声谱级^[25],可以在接收端按照水声信道衰减特性的相反数对接收信号进行补偿,增加高频频段的信号量级,提高检测性能。基于以上思路,结合对激光致声信号频谱的分析及水声信道的特点,提出一种使用预补偿能量检测器来检测激光致声信号的方法。在进行 FFT 之前,首先将信号通过一个预补偿滤波器,预补偿滤波器按照图 6 所示的不同频率的衰减特性进行反向补偿。然后对信号进行 FFT,判断 50~100 kHz 范围内的信号能量,并作出是否存在信号的判断(图 9)。

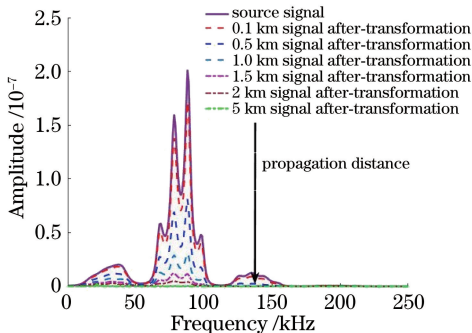


图 8 不同距离下激光声信号功率谱图

Fig. 8 Power spectrum of laser-sound signals at different distances

4 实验结果与分析讨论

为了验证预补偿频域能量检测器的性能,对信号采用补偿频域能量检测和不采用频域能量检测两种方式的检测性能进行蒙特卡罗仿真,其仿真流程如图 10 所示。仿真中采用的信号为实际测量得到的激光致声信号。信号首先经过信道滤波器,按照传播距离和衰减系数对不同频率的信号进行衰减,然后按照信噪比计算噪声功率并添加噪声,得到两

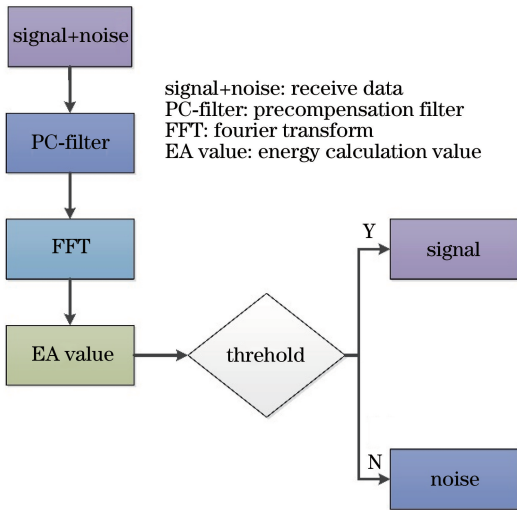


图 9 预补偿能量检测器

Fig. 9 Pre-compensation energy detector

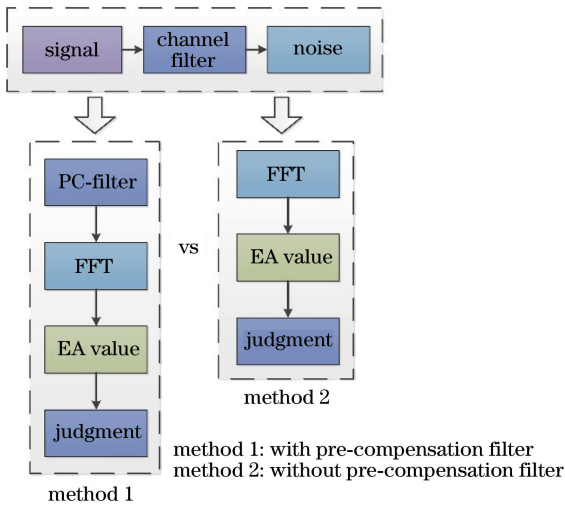
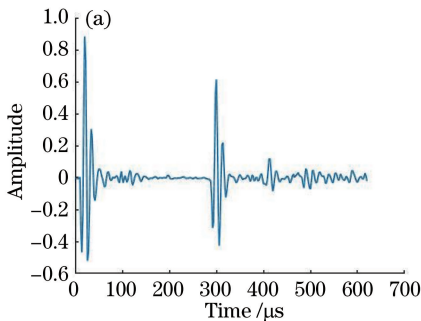


图 10 预补偿能量检测器蒙特卡罗仿真流程

Fig. 10 Monte-Carlo simulation process of pre-compensation energy detector

种方式的检测信号。方法 1 采用带有补偿的能量检



测器,方法 2 只进行频域能量检测,得到在不同距离处的检测结果如图 11 所示。在图 11 中,without pre-compensation filter 表示不含预补偿滤波器的仿真结果,with pre-compensation filter 表示含有预补偿滤波器的仿真结果。

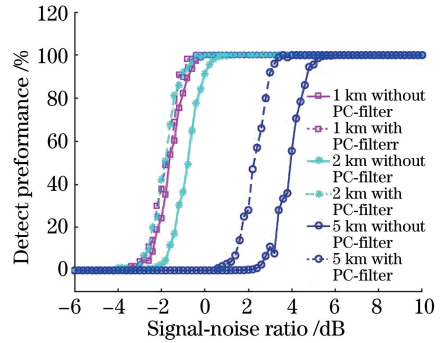


图 11 预补偿能量检测器的蒙特卡罗仿真结果

Fig. 11 Monte-Carlo simulation result of pre-compensation energy detector

从图 11 的仿真结果可以看出:1)随着传播距离的增加,50~100 kHz 范围内的信号衰减量逐渐变大,信号检测性能曲线右移,检测性能下降,需要的零误检信噪比增加。2)在近距离处,由于信号的衰减量并不大,此时 50~100 kHz 范围内信号的能量较大,两种检测方案的检测性能相差较小;但当信号的传播距离增大,信号的衰减量增加,带有预补偿滤波器的检测器检测性能更优,所需的零误检信噪比也更低。

为了检测预补偿频域能量检测器的性能,在水池中对信号的检测性能进行了测试,受到测试条件的限制,测试时接收端和发射端的距离设置为 12 m,采集得到的时域信号波形如图 12(a)所示。由于激光致声信号的源级较高,信号检测难度较小,无法体现预补偿频域能量检测器的性能,所以对补偿和非补偿的信号频谱特性进行分析[图 12(b)]。

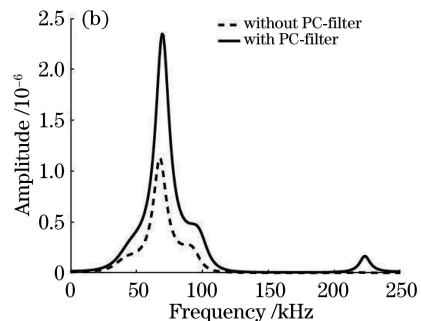


图 12 水池实验的时域信号及功率谱。(a)时域信号;(b)功率谱

Fig. 12 Time-domain signal and power spectrum in tank test. (a) Time-domain signal; (b) power spectrum

从图 12(b)可以看出,预补偿频域能量检测器会随着频率的升高提高信号补偿倍数,在高频处可能导致小信号的放大。但由于检测的频谱范围为 50~100 kHz,在此范围内,预补偿频率能量检测器使原始信号的能量更强,在检测门限一定的情况下,检测性能更优。

5 结 论

在其他研究者分析激光致声信号频谱信息及传播特性的基础上,结合实测的激光致声信号时频域特性,分析了激光致声信号的传播特性,设计出一种包含预补偿滤波器的简易频域能量检测器,其蒙特卡罗仿真结果表明包含预补偿滤波器的频域能量检测器对激光致声信号有更好的检测性能。激光致声信号频谱能量集中,存在明显的分段效应,大致可以分为低频段、中频段、高频段,且信号的能量集中在中频段;随着传播距离的增加,信号主值能量快速衰减,基于频域能量检测器的信号检测性能下降,所需的零误检信噪比增高。基于预补偿滤波器的频域能量检测器能够提高信号的检测性能,降低信号零误检信噪比。在 95% 的检测概率下,基于预补偿滤波器的频域能量检测器所需的信噪比相对于传统频率能量检测器低 1 dB~1.5 dB。

参 考 文 献

- [1] Huang T C, Tao B Y, Mao Z H, *et al.* Classification of sea and land waveform based on multi-channel ocean lidar [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(6): 0610002.
黄田程, 陶邦一, 毛志华, 等. 基于多通道海洋激光雷达的海陆波形分类[J]. 中国激光, 2017, 44(6): 0610002.
- [2] Huang T C, Tao B Y, He Y, *et al.* Waveform processing methods in domestic airborne lidar bathymetry system [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(8): 082808.
黄田程, 陶邦一, 贺岩, 等. 国产机载激光雷达测深系统的波形处理方法[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(8): 082808.
- [3] Zhang Y X, Shang J H, He Y. Research process of airborne laser bathymetry [J]. Laser Technology, 2018, 42(5): 588-592.
张熠星, 尚建华, 贺岩. 机载激光测深技术的研究进展[J]. 激光技术, 2018, 42(5): 588-592.
- [4] White R M. Elastic wave generation by electron bombardment or electromagnetic wave absorption [J]. Journal of Applied Physics, 1963, 34(7): 2123-

- 2124.
- [5] Egerev S V, Ivakin A N, Ovchinnikov O B, *et al.* Laser-induced underwater acoustic source for remote sensing of sea floor[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1994, 95(5): 3021-3021.
- [6] Blackmon F, Antonelli L T, Kalinowski A, *et al.* A remote optical system for port and harbor defense [J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5780: 99-106.
- [7] Wang X Y, Wang J A, Zong S G, *et al.* Spectrum characteristics of laser-induced acoustic signals [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(7): 1639-1642.
王晓宇, 王江安, 宗思光, 等. 激光声信号的频谱特性[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(7): 1639-1642.
- [8] Blackmon F. Linear and non-linear opto-acoustic underwater communications [D]. Massachusetts: The University of Massachusetts North Dartmouth, 2003.
- [9] Blackmon F A, Antonelli L T. Experimental detection and reception performance for uplink underwater acoustic communication using a remote, in-air, acousto-optic sensor [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2006, 31(1): 179-187.
- [10] Blackmon F, Estes L, Fain G. Linear optoacoustic underwater communication [J]. Applied Optics, 2005, 44(18): 3833-3845.
- [11] Blackmon F, Antonelli L. Remote, aerial, trans-layer, linear and non-linear downlink underwater acoustic communication [C] // Oceans 2006, September 18-21, 2006, Boston, MA, USA. New York: IEEE, 2006: 306856.
- [12] Wang Y H, Wang J A, Zong S G, *et al.* Coincidence relation between laser pulse energy and hydroacoustic speciality[J]. Laser & Infrared, 2008, 38(10): 981-983.
王雨虹, 王江安, 宗思光, 等. 激光声特性与激光脉冲能量对应关系研究[J]. 激光与红外, 2008, 38(10): 981-983.
- [13] Zong S G, Wang J A, Wang Y H. Experiment investigation of water breakdown characteristic by high power laser [J]. Opto-Electronic Engineering, 2008, 35(11): 68-72.
宗思光, 王江安, 王雨虹. 脉冲激光击穿水介质特性的实验研究[J]. 光电工程, 2008, 35(11): 68-72.
- [14] Wang X Y, Wang J A, Zong S G, *et al.* Experimental study on communication using laser-generated sound [J]. Laser & Infrared, 2011, 41(8): 856-860.
王晓宇, 王江安, 宗思光, 等. 激光声信号作为通信声源的实验研究[J]. 激光与红外, 2011, 41(8): 856-860.

- [15] Deng Y, Jin T, Chi H, *et al.* Collapse of laser induced bubbles and generated sound pressure waves [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(11): 2793-2798.
邓圆, 金韬, 池灏, 等. 激光空泡溃灭及其产生的声波[J]. *强激光与粒子束*, 2013, 25(11): 2793-2798.
- [16] Deng Y. The propagation of intense ultrashort laser pulse and applications of laser pulse in underwater sound source [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013: 42-88.
邓圆. 超短脉冲强激光在介质中的传输及激光在水下声源中的应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2013: 42-88.
- [17] Feng S S. Laser-sound in liquid and its application in ocean development [J]. *Technical Acoustic*, 1992 (Z1): 17-22.
冯绍松. 激光在液体中发声及其在海洋开发中的应用[J]. *声学技术*, 1992(Z1): 17-22.
- [18] Cabric D, Mishra S M, Brodersen R W. Implementation issues in spectrum sensing for cognitive radios [C] // *Conference Record of the Thirty-Eighth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, 2004., November 7-10, 2004, Pacific Grove, CA, USA. New York: IEEE, 2004: 772-776.
- [19] Zhang A M, Fan B, Zhang Z. Spectrum sensing performance analysis based on energy detector in fading channel[J]. *Telecommunications Information*, 2011(10): 25-27.
张爱民, 范波, 张增. 衰落信道下基于能量检测器的频谱感知性能分析[J]. *电信快报*, 2011(10): 25-27.
- [20] Jia N, Huang J C. An overview of underwater acoustic communications [J]. *Physics*, 2014, 43(10): 650-657.
贾宁, 黄建纯. 水声通信技术综述[J]. *物理*, 2014, 43(10): 650-657.
- [21] Blackmon F, Antonelli L. Experimental demonstration of multiple pulse nonlinear optoacoustic signal generation and control [J]. *Applied Optics*, 2005, 44(1): 103-112.
- [22] Hui J Y, Sheng X L. Marine navigation systems [M]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 2011: 20-22.
惠俊英, 生雪莉. 水下声信道[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2011: 20-22.
- [23] Liu Z W, Bao Y, Lü L G, *et al.* The effect of global climate change on ocean sound absorption [J]. *Advances in Marine Science*, 2017, 35(2): 210-220.
刘宗伟, 鲍颖, 吕连港, 等. 全球气候变化对海洋声吸收系数的影响研究[J]. *海洋科学进展*, 2017, 35(2): 210-220.
- [24] Qi Y R, Xu L J, Zhang D Y, *et al.* Directivity of sound field generated through mechanism of laser-induced liquid breakdown in water [J]. *Acta Acustica*, 1991, 16(2): 145-151.
戚诒让, 许龙江, 张德勇, 等. 水下光击穿所激发的声场的方向特性[J]. *声学学报*, 1991, 16(2): 145-151.
- [25] Li Z L. Modification for the empirical relationship of ambient noise source level in shallow water [C] // 2010 National Congress and Academic Conference of China Acoustics Society. Shanghai: Technical Acoustics, 2010: 2.
李整林. 海洋环境噪声源级经验公式修正 [C] // 中国声学学会 2010 年全国会员代表大会暨学术会议论文集. 上海: 声学技术, 2010: 2.