

激光等离子体声信号特性

卢志刚¹, 战仁军², 王晓宇³

(1. 武警后勤学院 军交运输系, 天津 300309; 2. 武警工程大学 装备工程学院, 陕西 西安 710086;
3. 海军工程大学 电子工程学院, 湖北 武汉 430033)

摘要: 为了对激光等离子体声信号特性进行深入研究, 构建了激光声实验系统。使用波长 $1.06\ \mu\text{m}$ Nd:YAG 脉冲激光聚焦击穿水介质产生激光等离子体声信号, 使用水听器对信号进行接收, 通过高速摄像机对信号产生过程进行了记录。分析了激光等离子体声信号的时频域特征。从理论上研究了激光等离子体声信号的指向性和传输特性, 并进行了实验验证。研究表明: 激光等离子体声信号时域脉宽为 $15\ \mu\text{s}$ 左右, 频带宽度为 $200\ \text{kHz}$, 主频在 $70\ \text{kHz}$ 左右。信号在不同传输角度上的幅度差异很小, 按照近似 $1/r$ 的规律衰减, 传输过程中主频逐渐减小。

关键词: 激光等离子体声信号; 光致击穿; 激光光学; 水下声波

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)09-2844-05

Characteristics of laser-induced plasma acoustic signal

Lu Zhigang¹, Zhan Renjun², Wang Xiaoyu³

(1. Military Transportation Department, Logistics University of CAPF, Tianjin 300309, China;
2. Institute of Equipment Engineering, Engineering University of CAPF, Xi'an 710086, China;
3. Department of Electronic Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: The experimental system for laser-induced acoustic signals had been built for research on characteristic of laser-induced plasma acoustic signals. Acoustic signals were produced by pulsed laser focusing into water. A hydrophone was used to receive the acoustic signals. A high speed camera was used to record the breakdown procession. Time and frequency domain of laser-induced plasma acoustic signals were studied. Its directivity and transmission characteristic were analyzed theoretically, and proven by experiment. The results are as follows: The pulse width of laser-induced plasma acoustic signals is about $20\ \mu\text{s}$, its frequency width is $500\ \text{kHz}$ and main frequency is $70\ \text{kHz}$. It transmits in all directions and decreases proportionally to $1/r$, main frequency decreases as distance increases.

Key words: laser-induced plasma acoustic signal; optical breakdown; laser optics; underwater acoustic signal

收稿日期: 2014-01-21; 修订日期: 2014-02-25

基金项目: 国家自然科学基金(51109217, 51209210)

作者简介: 卢志刚(1971-), 男, 副教授, 主要从事军事装备方面的研究。Email: lzgxian71@sina.com

0 引言

高功率脉冲激光通过光学系统在水下聚焦,当聚焦区域的功率密度超过一定阈值时,会发生水介质的光学击穿现象,辐射声波,称作激光声信号。近年来,广大学者对激光声特性及其水下应用进行了广泛的研究和深入的探索,取得了一定的研究成果。其中,宗思光等人对激光声水下探测进行了理论研究和实验验证^[1],李胜勇等人研究了激光声信号的频谱特性^[2-3],Vogel 等人对激光击穿液体介质过程中的能量转换问题进行了计算^[4-5],Blackmon 等人对基于激光致声技术的空中对水下目标的信息传输进行了初步探索^[6-7]。激光声由两种信号组成,根据产生原因,分为空泡溃灭声信号和激光等离子体声信号,前者是由空泡在脉动末期的溃灭阶段产生的,后者是由等离子体的膨胀产生的,两者具有很高的相关系数,因此已有研究是对两者进行统一分析。为了实现对激光声信号更详细深入的了解,对激光等离子体声信号进行单独分析是很有必要的。

文中对激光等离子体声信号的产生过程进行了高速摄像记录,从时频域分析了其信号特征,通过理论分析和实验研究了其指向性和衰减特性,研究结果可以为开展水下激光声应用提供一定的参考。

1 理论分析

当水介质被激光聚焦击穿后,产生的等离子体属于球形腔体,当等离子体膨胀时,其周围介质被压缩,从而介质密度发生变化,产生压力场,辐射声信号,即激光等离子体声信号,该信号可以通过波动方程描述^[8]:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = c^2 \left[\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial p}{\partial r} \right) \right] \quad (1)$$

式中: p 为声压; t 为时间; c 为水下声速; r 为接收点至声源的距离。在自由空间条件下,公式(1)的通解为:

$$p(r, t) = \frac{A_0}{r} f(r-ct) \exp[j(\omega t - kr)] \quad (2)$$

式中: A_0 为声压初始幅度; f 为任意函数; k 为波数; ω 为信号圆频率。

在 $t=0$ 时刻,等离子体开始对外膨胀,激光作用结束后,等离子体腔体立即冷却,介质由快速弛豫过程恢复至平衡态,于是有:

$$\Delta V = \Delta V_0 \exp\left(-\frac{t}{\sigma}\right) \quad (3)$$

式中: ΔV 为 t 时刻等离子体的体积增量, ΔV_0 为 $t=0$ 时刻等离子体的体积增量; σ 为等离子体声信号的衰减常数,表示声压幅度变为 $1/e$ 所需时间。

等离子体声信号传播 r 距离,需要时间 r/c ,由以上条件可以求得:

$$f(r-ct) = \exp\left(-\frac{t-r/c}{\sigma}\right) \quad (4)$$

将公式(4)和公式(2)联立,推导出传播距离为 r 的声压表达式为:

$$p(r, t) = \frac{A_0}{r} \exp\left(-\frac{t-r/c}{\sigma}\right) \exp[j(\omega t - kr)] \quad (5)$$

其中, A_0 可以通过水下爆炸理论得到^[9]:

$$A_0 = \frac{1}{2} \rho^{0.7} \left(\frac{3\gamma-1}{4\pi} \right)^{0.3} E^{0.3} \tau^{0.1} c^{1.5} \left[2 \ln \left(\frac{r}{R_0} \right) \right]^{-0.5} \quad (6)$$

式中: R_0 表示等离子体腔体的最大半径; γ 代表水的热力学参数; ρ 为水介质的密度; E 为脉冲激光能量; τ 为激光脉宽。

2 实验系统设计

激光声实验系统结构如图 1 所示。实验使用调 Q Nd:YAG 激光器输出脉冲激光,激光波长 $1.06 \mu\text{m}$,脉宽为 8 ns ,能量在 $100 \sim 700 \text{ mJ}$ 范围内可调。在光路上放置了 45° 分光镜,分光后的激光由能量计进行监测。利用无指向性的水听器实现对激光声信号的接收,水听器的线性频宽为 $2 \sim 400 \text{ kHz}$,灵敏度级 -216 dB (参考值为 $1 \text{ V}/\mu\text{Pa}$)。水听器与声源相距 20 mm ,其接收的激光声信号通过电缆送 Agilent 7104A 示波器显示,再通过计算机对信号进行保存、分析。激光致声过程通过高速摄像机进行记录,高速摄像机最高拍摄帧率为 $1\,000\,000 \text{ frame/s}$ 。

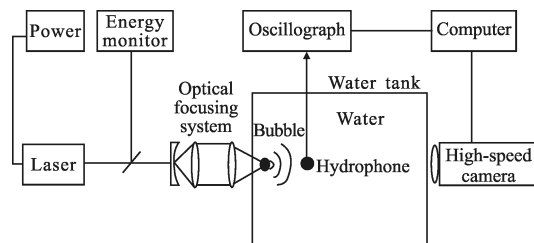


图 1 激光声实验系统图

Fig.1 Experiment system of laser-induced acoustic signal

3 实验结果分析

3.1 高速摄影结果

图 2 是由高速摄像机记录的激光致声过程中产生的冲击波图像序列。图中,相邻图像间的时间间隔为 $1\ \mu\text{s}$ 。可以看出,在第一、二帧图片中,等离子体发生膨胀运动。由于等离子体腔体内是高温高压环境,所以在其膨胀过程中,周围水介质被汽化,有空泡产生。第三帧图片中,等离子体消失,出现了向外传播的冲击波和脉动的空泡。图中,圆环状阴影是冲击波波阵面,之所以呈阴影状,是因为冲击波改变了周围水介质的密度,使其折射率发生改变,光线发生偏

离,未能进入镜头。冲击波的能量衰减速度非常快,在很短的传播距离内就衰减为声波,即激光等离子体声波。

因为高速摄像机的存储空间有限,所以没能在一次拍摄过程中同时记录冲击波辐射和空泡脉动过程。图 3 是通过高速摄像机记录的空泡一次完整的脉动过程。相邻图片的时间间隔为 $28\ \mu\text{s}$ 。可以看出,开始空泡在内外压差的作用下进行膨胀运动,在膨胀到一定程度时,空泡的内压和外压相等,可是由于惯性,空泡将继续进行膨胀运动,当空泡膨胀至最大半径时,其内压小于外压,从而开始进行收缩运动。从摄像结果可以看出其膨胀和收缩运动具有良好的对称性。

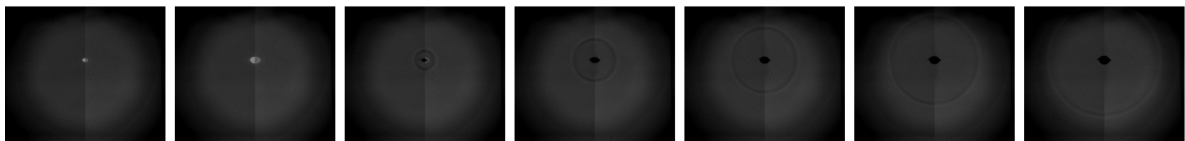


图 2 冲击波图像

Fig.2 Images of shock waves

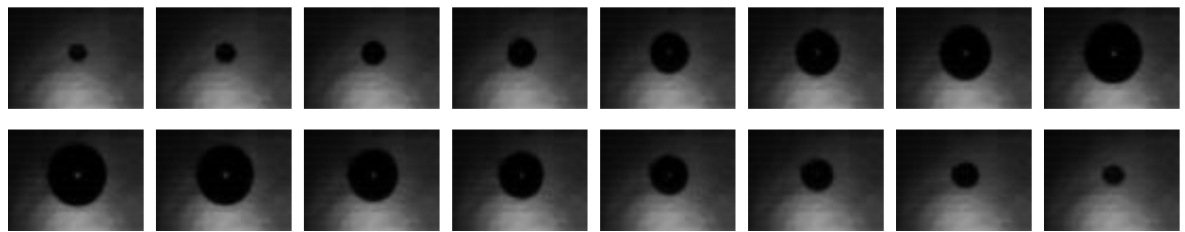
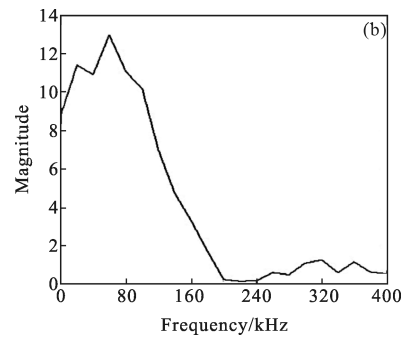


图 3 空泡脉动图像

Fig.3 Images of bubble movements

3.2 信号时频域分析

激光等离子体声信号波形和频谱分别如图 4(a)和 4(b)所示。从图中可以看出,激光等离子体声信号是双极性脉冲。其中,正极性脉冲峰值是负极性脉冲

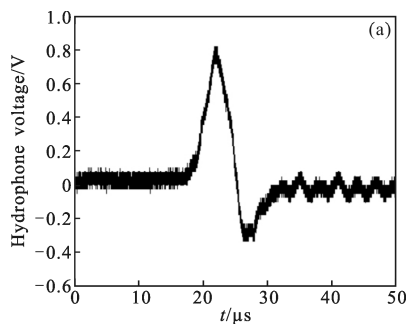


(b) 频域

(b) Frequency domain

图 4 激光等离子体声信号

Fig.4 Laser-induced plasma acoustic signal



(a) 时域

(a) Time domain

峰值约 2.5 倍。信号时域脉宽很窄,约为 $15\ \mu\text{s}$,存在约 $20\ \mu\text{s}$ 的拖尾。对该信号进行傅里叶变换,得到其

频谱如图 4(b)所示,信号的频域宽度为 200 kHz,主频为 70 kHz。激光等离子体声信号窄脉宽特性使其具备良好的水下应用潜力,可以对水下微小物体进行精确探测。

3.3 信号指向性分析

激光等离子体声信号以球面波的形式向外传播,在理想条件下,波阵面上各点的信号幅度相同,这样不同接收角度上的信号幅度相同。信号指向性函数可以表示为:

$$D_{\text{rec}}(\theta) = \frac{p(L, \theta)}{p(L, 0)} = 1 \quad (7)$$

式中: $p(L, \theta)$ 表示和激光声源相距距离 L 处,声源-激光器连线与水听器-声源连线之间的夹角为 θ 时,激光等离子体声信号的幅度; $p(L, 0)$ 表示距离激光声源 L 处,水听器、激光声源、激光器处于同一直线时,激光等离子体声信号的幅度。

图 5 是实验得到的激光等离子体声信号指向性图。可以看出,理论分析和测量结果基本相符。两者的差异很小。造成差异性的主要原因等是激光等离子体的能量密度有一定的差异性,处于光轴上的等离子体对激光能量的吸收更充分,而在光轴两侧的等离子体吸收的激光能量较小。这样使得光轴上比光轴两侧声信号幅度更大。

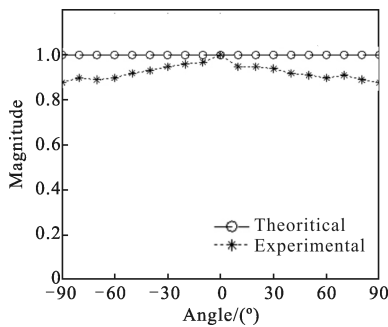


图 5 激光等离子体声信号指向性图
Fig.5 Directivity of laser-induced plasma acoustic signal

3.4 信号传输性分析

在水下传播的声信号,其能量衰减主要是由两个原因引起的^[10]:首先,随着传输距离的增加,波阵面在不断扩展,使得波阵面上声信号能量密度减小,这称为扩展损耗。其次,实际的海水环境并不属于理想介质,声信号在传播过程中,能量被海水介质吸收,将声能转换成其他能量(如热能等),这种损失称为衰减损耗。

根据公式(5)可知,由于波阵面扩展引起的不同传输距离上声压幅度变化可以表示为:

$$p_r = \frac{1}{r} p_1 \quad (8)$$

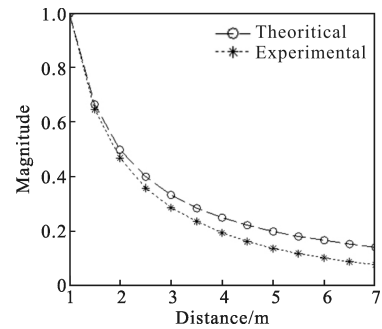
式中: p_r 为 r 距离上的激光等离子体声信号幅度; p_1 是单位距离上激光等离子体声信号幅度。

根据热传导吸收和经典切变粘滞吸收理论,得出声波吸收的斯托克斯-克希霍夫公式,吸收系数 δ 可以写为:

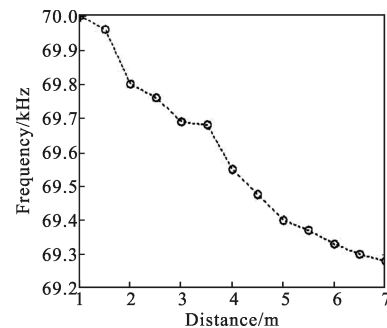
$$\delta = f^2(A_\eta + A_x) = f^2 \left\{ \frac{8\pi^2 \eta_s}{3\rho v^3} + \frac{4\pi^2}{\rho v^3} \left[\kappa \left(\frac{1}{c_v} - \frac{1}{c_p} \right) \right] \right\} \quad (9)$$

式中: f 为声波频率; A_η 和 A_x 分别表示切变粘滞吸收和热传导吸收; η_s 为介质的切变粘滞系数; ρ, v 分别为介质密度和介质中的声速; c_v 表示介质定容比热; c_p 为介质定压比热; κ 为介质的热传导系数。对于纯水介质,计算得到 $A_\eta \cong 6.54 \times 10^{-15} \text{ s}^2/\text{m}$, $A_x \cong 0.5 \times 10^{-17} \text{ s}^2/\text{m}$ 。从公式(9)可知,声信号的频率越高,由水介质吸收引起的能量损耗越大。但是总体看来,近场范围内,水介质吸收对声信号的能量损失影响较小,造成声信号幅度减小的主要原因是扩展损耗。

图 6 是实验测量得到的激光等离子体声信号在



(a) 峰值幅度
(a) Peak magnitude



(b) 主频
(b) Main frequency

图 6 激光等离子体声信号传输特性

Fig.6 Transmission of laser-induced plasma acoustic signal

不同距离上的幅度和主频变化情况。其中,理论计算对吸收损耗造成的声压变化忽略不计。从图中可以看出,图 6(a)中理论分析和测量结果基本相符。随着传输距离的逐渐变大,吸收损耗引起对声压变化造成的影响逐渐变大,因此,理论值和测量结果的差异性逐渐增加。图 6(b)是计算得到的不同距离上激光等离子体声信号的主频,结果表明:随着传输距离的增加,信号主频逐渐减小。这种现象的产生是由水介质对声信号中不同频率成分吸收系数的差异性引起的。

4 结 论

通过理论分析和实验测量,对激光等离子体声信号特性进行了研究。结果表明:激光等离子体声信号的脉宽在 15 μs 左右,频谱宽度为 200 kHz,主频为 70 kHz。信号在不同传输角度上的幅度变化不大。信号幅度按照近似 $1/r$ 的规律衰减,传输过程中信号主频有所降低。研究结果可以为激光声信号的实际应用提供一定的理论参考。今后将构建相应的实验平台,对激光等离子体声信号特性进行更加深入详细的研究,为其水下实际应用奠定坚实的理论基础。

参 考 文 献:

- [1] Zong Siguang, Wang Jiang'an, Ma Mingkui, et al. Investigation of laser-induced acoustics signal for target detection [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37 (5): 1332-1337. (in Chinese)
宗思光, 王江安, 马明奎, 等. 水下目标探测的激光声特性 [J]. 中国激光, 2010, 37(5): 1332-1337.
- [2] Li Shengyong, Hu Shengliang, Liu Xiaoran, et al. Spectrum properties of laser-induced cavitation bubble collapse sound waves [J]. *Laser Technology*, 2007, 31(3): 281-284. (in Chinese)
李胜勇, 胡生亮, 刘晓然, 等. 激光空泡溃灭辐射声波声谱特性研究 [J]. 激光技术, 2007, 31(3): 281-284.
- [3] Li Shengyong, Huang Gaoming, Liu Xiaoran, et al. Spectrum properties investigated of laser-induced plasma sound waves under water [J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2007, 18(4): 0495-0497. (in Chinese)
李胜勇, 黄高明, 刘晓然, 等. 液体中激光等离子体声波声谱特性研究 [J]. 光电子·激光, 2007, 18(4): 0495-0497.
- [4] Vogel A, Noack J, Nahen K, et al. Energy balance of optical breakdown in water [C]//SPIE, 1998, 3254: 180-189.
- [5] Brujan E A, Vogel A. Stress wave emission and cavitation bubble dynamics by nanosecond optical breakdown in a tissue phantom [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2006, 558: 281-308.
- [6] Blackmon F, Antonelli L. Remote, aerial, opto-acoustic communication and sonar [C]//SPIE, 2005, 5778: 800-808.
- [7] Antonelli L, Blackmon F. Experiment demonstration of multiple pulse non-linear opto-acoustic signal generation and control [J]. *Applied Optics*, 2005, 44(1): 103-112.
- [8] Xu Xiaomei. Fundamentals of Acoustics [M]. Beijing: Science Press, 1998: 102. (in Chinese)
许肖梅. 声学基础 [M]. 北京: 科学出版社, 1998: 102.
- [9] Chen Qingming. Research of acoustics induced by pulsed CO₂ laser in water [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2009. (in Chinese)
陈清明. 脉冲 CO₂ 激光水下致声特性研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.
- [10] Xu Xiaomei. Fundamentals of Acoustics [M]. Beijing: Science Press, 1998: 102-105. (in Chinese)
许肖梅. 声学基础 [M]. 北京: 科学出版社, 1998: 102-105.