一种新的改善激光声信号特性的方法

王晓宇,王江安,宗思光,刘 涛,李胜勇

(海军工程大学 电子工程学院,湖北 武汉 430033)

摘 要:为了改善激光声信号的特性,设计了激光声换能器。对换能器的设计原理和结构进行了说明。构建了激光声实验系统,利用脉冲激光分别在自由场和换能器内部聚焦击穿水介质产生声信号,由水听器将声信号转换成电信号并送入数字存储示波器。对两种条件下产生的激光声信号特性进行了比较。结果表明:同自由场产生的激光声信号相比,利用换能器产生的激光声信号特性有了一定程度的改善。其中,信号峰值幅度提高了 3 倍,能量向 60 kHz 以下频段集中,1 m 处发散角压缩到 13.2°,衰减速度变慢。

关键词:激光声信号; 换能器; 特性

中图分类号:TN249 **文献标志码**:A **文章编号**:1007-2276(2014)05-1449-05

A new method for improving characteristic of laser-induced acoustic signals

Wang Xiaoyu, Wang Jiang'an, Zong Siguang, Liu Tao, Li Shengyong

(Department of Electronic Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: For improving the quality of laser-induced acoustic signals, the laser-induced acoustic signal transducer was designed, its design theory and structure was analyzed and depicted. Experimental system was built. The pulsed laser was focused into water inside the transducer and in the free field respectively. A hydrophone was used to receive the acoustic signal and convert it into electric signals, a oscilloscope was connected with the hydrophone to display the signals. Laser-induced acoustic signals produced in two different environments have been compared. The results are as follows: compared with laser-induced acoustic signal produced in free field, that produced in the transducer has improved in its qualities. Peak pressures are 3 times larger. Signal energy is more concentrated below 60 kHz. Radiation angle has been decreased to 13.2° in 1 m distance. Signal attenuation gets slower.

Key words: laser-induced acoustic signal; transducer; characteristic

收稿日期:2013-09-05; **修订日期**:2013-10-03

基金项目:国家自然科学基金(51109217,51209210);装备预研基金(51400010105JB1101)

作者简介:王晓宇(1987-),男,博士生,主要从事激光声方面的研究。Email:xiaoyu198725@sina.com

导师简介:王江安(1951-),男,教授,博士生导师,主要从事激光应用方面的研究。 Email:gdyfzx@163.com

0 引 言

激光与液体介质相互作用，当激光的功率密度超过了液体的击穿阈值时，在击穿区域产生等离子体，等离子体通过逆韧致等方式吸收激光能量，向液体中辐射声波，即激光声信号[1]。作为一种新的水下声源激发方式，它具有产生方式机动灵活、声源级高等诸多优点。目前，国内外学者都在开展光激光声在不同领域的应用研究[2-8]。其中，Blackmon[2-3]提出了激光声通信中的信号调制、解调方法；宗思光[4-5]构建了激光声通信系统，进行了激光声通信的实验验证，利用激光声实现了对水下目标的探测；刘涛[6]设计了利用激光声进行水下探测的设备；沈中华[7]等人对激光声进行物质表面检测进行了深入研究，Sayal[8]对脉冲激光波形和激光声信号的关系进行了研究。以上研究结果表明：利用激光声实现水下信息传递、目标获取具有一定的可行性。但该方案仍然存在两个主要问题：(1) 激光声衰减速度较快，限制了其作用距离；(2) 激光声信号发散角很大，不能满足现代通信保密性的要求。因此，如何通过技术方式来克服以上问题对激光声发展带来的不利影响，是一个十分重要的课题。

文中利用设计的激光声换能器(以下简称换能器)，构建了实验系统，对在换能器内部和自由场中产生的激光声信号在时频域特性、传输特性、指向性等方面进行了比较，体现了换能器在改善激光声信号特性上的优势，研究结果可以为开展激光声的水下应用提供一定的参考。

1 换能器结构

换能器结构如图 1 所示。**L** 是激光聚焦系统，激光经过 **L** 后再由透光窗口会聚到 **O** 点，击穿水介质，产生激光声信号。**TP** 是声的硬面反射抛物面，**SH** 是半球面，**O** 点是半球面 **SH** 的球心、激光聚焦点和抛物面 **TP** 焦点三点的重合点。产生的激光声信号有两种传输路径。第一种是经 **TP** 反射后向外辐射，称为一次反射波，其典型路径如 **OP-PZ**。第二种是经过 **SH** 反射后，再经过 **TP** 反射，称为二次反射波，其典型路径为 **ON-NO-OQ-QH**。根据声的硬面(反射面的特性阻抗远远大于换能器内水介质的特性阻抗)反射理论和抛物面性质，抛物面的任意反射声线(如 **PZ** 和 **QH**)与旋转抛物面的轴 **OX** 平行，即 **CM**∥**AN**∥**OX**。下面证明在 **ZH** 面上的声波是平面波。

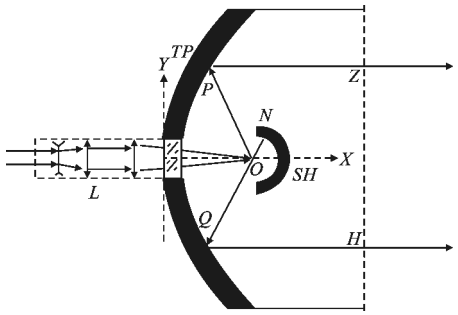


图 1 换能器结构图

Fig.1 Diagram of laser-generated acoustic transducer

在换能器内建立 **xy** 坐标系，设 **O** 点坐标为(**p**/2,0)，**P** 点坐标为(**x**,**y**)，**Z** 点坐标为(l,**y**)。在 **xy** 平面内的抛物面方程可以写成：

$$y^2=2px \tag{1}$$

声线 **OPZ** 的传播路程表示为：

$$OP+PZ=\sqrt{(x-p/2)^2+y^2}+\sqrt{(l-x)^2+y^2} \tag{2}$$

把公式(1)代入(2)，整理得 **OP+PZ=p**/2+l，由于 l 与 **p** 是常数，并且 **P** 是抛物面上的任意一点，所以一次反射波到达 **ZH** 面的距离相等，又由于在 **O** 点开始的声波相位相同，所以在 **ZH** 面处所有的一次反射波的相位相同。同理，可证明所有的二次反射波到 **ZH** 面的路程相等，在 **ZH** 面上的相位相同。所以，在 **ZH** 面上声波是平面波。这样，经过换能器的作用后，激光声信号的波阵面由球面变成了平面，下面将进行实验研究这一变化对激光声信号的影响。

2 实验设计

激光声实验测量系统如图 2 所示。实验采用调 Q Nd:YAG 激光器，输出激光波长 1 064 nm，脉冲宽度 8 ns，激光器输出单脉冲能量为 3 mJ 可调。激光分别在自由场和激光声换能器内部水中聚焦击穿。对产生的激光声信号通过无指向性的水听器进行接收，水听器线性频带宽度为 2~600 kHz，灵敏度级为-216 dB(参考值为 1 V/μPa)，水听器与激光击穿点相距 1 m，其接收到的激光声信号通过电缆送入 Agilent7104A 型示波器进行采集，采样频率为 4 GHz。最后由计算机实现对信号的存储。

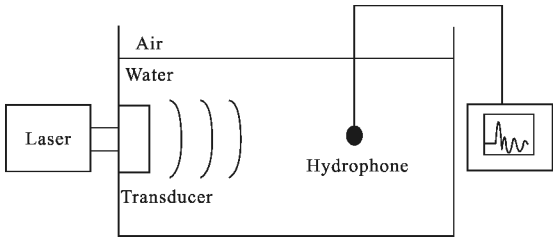


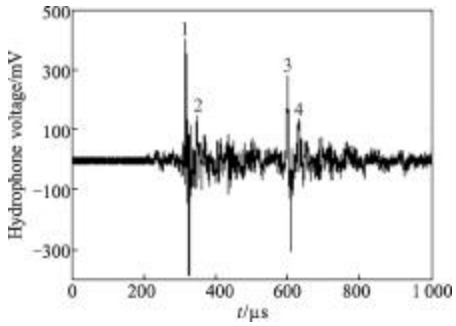
图 2 激光声实验系统图

Fig.2 Experiment system of laser-induced acoustic signal

3 实验结果分析

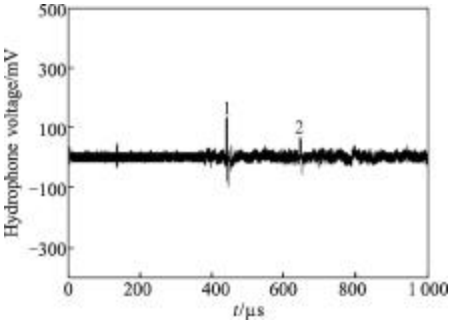
3.1 时域比较

如图 3 是水听器接收到的激光声信号时域波形图。可以看出,在自由场和换能器内产生的激光声信号差异较明显。首先,在自由场产生的激光声信号有两个峰值,即图 3(b)中标号 1,2 所示,两者分别是等离子体声波和空泡溃灭声波。而在换能器内部产生的激光声信号有有四个峰值,如图 3(a)标号 1,2,3,4 所示,其中,1、3 分别是等离子体声波和空泡溃灭声波在换能器内的一次反射波。1 和 2,3 和 4 在时间上相距 33 μs, 水中声速为 1 500 m/s, 可以计算出 1 和 3,2 和 4 声程差为 4.95 cm,经测量半球 **SH** 的半径为 2.5 cm,这样一、二次反射波的声程差为 5 cm,因此可知,2、4 分别是等离子体声波和空泡溃灭声波的二次反射波。同 1,3 相比,2、4 在幅度上较小,主要由以下两个原因造成:(1) 二次反射波比一次反射波多经过一次反射, 反射引起的损失大;(2) 声波在半球面 **SH** 反射时会在球心 **O** 点会聚, 压力变化剧烈,可能会引起空化的发生,从而使二次反射波的能量衰减严重。图 3(a)中激光声信号幅度要明显强于图 3(b)。这是由于换能器产生的激光声信号发散角度小,声能更集中,同时衰减速度慢。



(a) 换能器内部产生

(a) Inside transducer



(b) 自由场产生

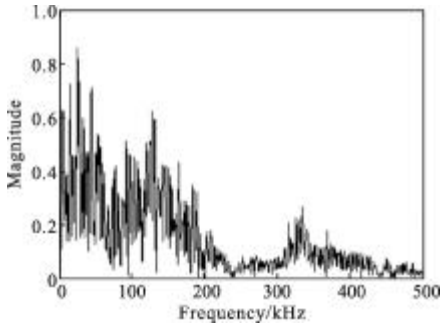
(b) In free field

图 3 激光声信号时域波形图

Fig.3 Waveform of laser-induced acoustic signal

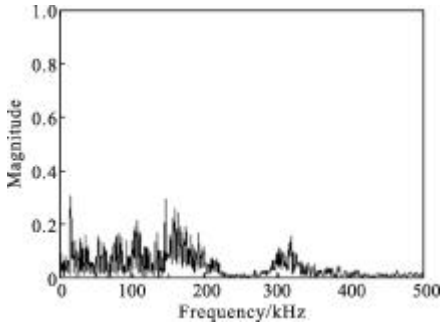
3.2 频域比较

图 4 是对图 3 中激光声信号进行快速傅里叶变化得到的频谱图。从图中可知两者频谱存在一定的差异性。通过计算得知图 4(a)中,激光声信号0~60 kHz, 60~500 kHz 所占能量比例分别为 36%和 64%,图 4(b)中相同频段内的能量比例则分别为 23%和 72%。



(a) 换能器内部产生

(a) Inside transducer



(b) 自由场产生

(b) In free field

图 4 激光声信号频域波形图

Fig.4 Spectrum of laser-induced acoustic signal

SH 的半径为 2.5 cm，当声线与光轴夹角即图 1 中 **XON** 在 0°左右时，声波会在 **SH** 和 **TP** 之间反射，如果声波的波长大于半球 **SH** 的半径，那么，声波会在半球 **SH** 边缘发生衍射，进而向外传播。如果声波波长小于半球 **SH** 的半径，那么在半球 **SH** 处发生衍射的概率降低，这样，声波会在 **SH** 和 **TP** 处多次反射，能量也随之耗尽。由此可知，半球 **SH** 起到了滤波的作用，滤除了部分声波波长小于 2.5 cm 的声波。又因为水下声速为 1 500 m/s，声波波长小于 2.5 cm 时，对应的频率高于 60 kHz。因此，在换能器内部产生的激光声信号 60 kHz 以上频段内的能量比例降低。

3.3 指向性比较

自由场产生的激光声信号是以球面波的形式对外传播，这样理论上在不同角度接收到的激光声信号幅度相同。因此可知自由场激光声信号的指向性可以表示为：

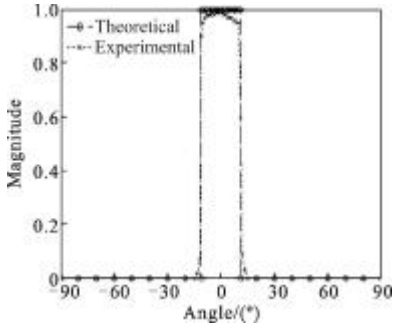
$$\mathbf{D}_{\text{free}}(\theta)=\frac{\mathbf{p}(\mathbf{L},\theta)}{\mathbf{p}(\mathbf{L},0)}=1 \tag{3}$$

式中：$\mathbf{p}(\mathbf{L},\theta)$是距离激光声源 **L** 处，测点-声源连线与声源-激光器连线之间的夹角为 θ 时，水听器测量得到的激光声信号峰值幅度；$\mathbf{p}(\mathbf{L},0)$是距离激光声源 **L** 处，测点、激光声源、激光器在同一直线时，水听器测量得到的激光声信号峰值幅度。

对于换能器内部产生的激光声信号，理想情况下是以平面波的形式对外传播，波阵面形状与换能器出射面相同，换能器出射面半径为 0.2 m，测点与激光声源相距 **L**，可以得知在换能器内产生的激光声信号指向性可以表示为：

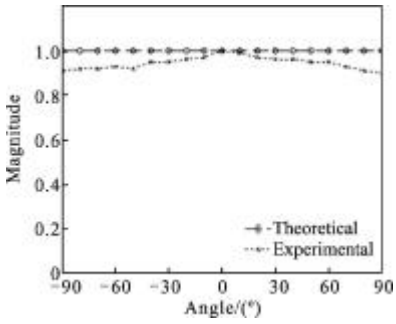
$$\mathbf{D}_{\text{tran}}(\theta)=\frac{\mathbf{p}(\mathbf{L},\theta)}{\mathbf{p}(\mathbf{L},0)}\begin{cases}1 & |\theta|<\arctan\dfrac{0.2}{\mathbf{L}}\\ 0 & |\theta|>\arctan\dfrac{0.2}{\mathbf{L}}\end{cases} \tag{4}$$

实验测量得到的激光声信号指向性如图 5 所示，图中水听器与激光声源相距 1 m，理论上换能器产生的激光声信号发散角为 12.1°，实际测量该值为 13.2°。两者基本相符，其差异性是因为有部分声波在换能器内部经过多次(大于 2 次)反射，从换能器出射时传播方向未能和图 1 中 **OX** 轴平行，引起了发散角的扩大。在自由场产生的激光声信号基本为全方向辐射，在不同角度上信号幅度变化很小。由实验结果可知，在换能器内部产生的激光声信号发射角度小，指向性更强。



(a) 换能器内部产生

(a) Inside transducer



(b) 自由场产生

(b) In free field

图 5 激光声信号指向性图

Fig.5 Directivity of laser-induced acoustic signal

3.4 传输性比较

声信号在水下传输时，造成声波能量在传播中损失的主要原因有：首先是由于波阵面在传播过程中的不断扩大，使得在单位时间内单位面积上能量的减小，称为扩展损耗。其次，实际的还是并非理想介质，在传播过程中将吸收声能而转换成其它能量(如热能等)，这种损失称为衰减损耗[9]。

对于自由场产生的激光声信号，在假定其波阵面是理想球面，由于扩展损耗造成的声压变化可以表示为：

$$\mathbf{p}_l=\frac{1}{\mathbf{r}}\mathbf{p}_1 \tag{5}$$

式中：$\mathbf{p}_l$ 为在 l 米处的激光声信号幅度，$\mathbf{p}_1$ 为 1 m 处激光声信号幅度。

对于在换能器内部产生的激光声信号，假定其波阵面是理想平面时，在声波传输过程中波阵面没有发生扩展，因此扩展损耗为 0，这样激光声信号在传播过程中声压不受扩展损耗影响。

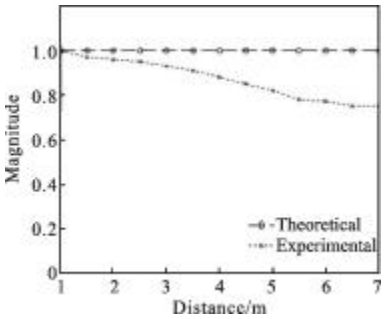
对于吸收损耗，根据经典切变粘滞吸收和热传

导吸收理论, 得到声波经典吸收的斯托克斯一克希霍夫公式,吸收系数 δ 可以表示为:

$$\delta=f^2(\mathbf{A}_\eta+\mathbf{A}_x)=f^2\left\{\frac{8\pi^2\eta_s}{2\rho v^3}+\frac{4\pi^2}{\rho v^3}\left[\kappa\left(\frac{1}{c_v}-\frac{1}{c_p}\right)\right]\right\} \quad (6)$$

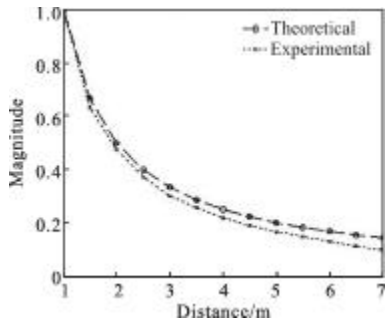
式中:f 为声波频率;η_s 为介质的切变粘滞系数;c_v 为介质定容比热;c_p 为介质定压比热容;κ 为介质热传导系数;ρ 和 v 分别为介质密度和介质中的声速;$\mathbf{A}_\eta$ 和 $\mathbf{A}_x$ 分别表示切变粘滞和热传导两部分。对于纯水经计算 $\mathbf{A}_\eta\cong 6.54\times10^{-15}\,s^2/m$, $\mathbf{A}_x\cong 0.5\times10^{-17}\,s^2/m$。可以看出,吸收损耗影响很小。

图 6 给出了激光声信号的传输特性。其中理论计算忽略了吸收损耗造成的声压变化。可以看出,理论值和测量值基本相符。对于自由场产生的激光声信号,随着传输距离的增加,水介质吸收对声压变化的影响逐渐变大, 因此理论值和测量值的差异性提高。换能器产生的激光声信号,其声压理论值和测量值的差异主要是由于声波从换能器出射后, 具有一定的发散角度, 这样其波阵面在传输过程中发生扩展,再加上水介质的吸收作用,造成了声压的衰减。



(a) 换能器内部产生

(a) Inside transducer



(b) 自由场产生

(b) In free field

图 6 激光声信号传输特性

Fig.6 Transmission of laser-induced acoustic signal

4 结 论

通过研究表明, 利用换能器产生的激光声信号特性有所改善,具体表现为:(1) 提高了信号强度,其峰值声压是自由场产生的信号的 3 倍;(2) 信号能量向低频段集中,60 kHz 内能量比例由 23% 提高到 42%;(3) 降低了信号发散角,在 1 m 距离上,其发散角为 13.2°,自由场信号为全角度辐射;(4) 提高了信号传输特性,减缓了信号的衰减速度。通过对换能器参数(焦点位置、抛物面曲率、反射半球面半径等)的改进,能够更好的提高激光声信号的指向性,可以使激光声压缩到更小的角度范围内, 这将是今后的研究方向。研究成果可以为开展激光声的水下应用提供理论参考和技术支持。

参考文献:

[1] Berthelot Y. Laser generation of sound by nonlinear thermal expansion[R]. America AD Report A276955MF, 1994: 34-36.

[2] Blackmon F, L Antonelli. Remote, aerial, opto-acoustic communication and sonar[C]//SPIE, 2005, 5778: 800-808.

[3] Antonelli L, Blackmon F. Experiment demonstration of multiple pulse non-linear opto-acoustic signal generation and control[J]. Applied Optics, 2005, 44(1): 0103-0112.

[4] 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)

[5] Zong Siguang, Wang Jiang'an. An opto-acoustic method for communication between aerial and underwater platforms [J]. Electronics Optics and Control, 2009, 16 (10): 75-79. (in Chinese)

[6] Liu Tao, Wang Jiang'an, Zong Siguang, et al. Design of underwater target detector by laser-induced sound signal[J]. Infrared and Laser Engeering, 2012, 41(7): 1767-1772. (in Chinese)

[7] Shen Zhonghua, Shi Yifei, Yan Gang, et al. Progress in the applications of laser induced surface acoustic waves [J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(S1): 239-243. (in Chinese)

[8] Sayal V K, Yadav L L, Mahesteari K P. Effect of time profile of laser pulse on the excitation of sound signals in a liquid with a series of laser pulse[J]. Journal of Sound and Vibration, 2011, 330: 1754-1761.