

## 激光诱导声信号通信技术的初步研究

赵中华<sup>1</sup>, 辛海燕<sup>2</sup>, 王晓宇<sup>3</sup>

- (1. 桂林电子科技大学 信息与通信学院, 广西 桂林 541004;
2. 桂林航天工业学院 电子工程系, 广西 桂林 541004;
3. 海军工程大学 电子工程学院, 湖北 武汉 430033)

**摘要:** 构建了激光声实验测量系统, 利用脉冲激光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。分析了激光声信号的时频域数学模型, 通过实验对单个激光声信号的时频域特征进行了研究, 对激光声通信的信号调制方式进行了理论分析和实验验证。研究表明: 激光声信号的脉宽约为 20  $\mu\text{s}$ , 其能量主要集中在 200 kHz 内, 这其中 100~200 kHz 内的能量占到的比例大约有 50%, 通过对激光声信号进行幅度调制和频率调制, 可以有效实现激光声通信过程。

**关键词:** 激光声信号; 光击穿; 频谱; 声信号

**中图分类号:** TN249    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1007-2276(2015)03-0863-04

## Primary research on technology of communication based on laser-induced acoustic signal

Zhao Zhonghua<sup>1</sup>, Xin Haiyan<sup>2</sup>, Wang Xiaoyu<sup>3</sup>

- (1. Department of Information and Communication, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China;
2. Department of Electronic Engineering, Guilin University of Aerospace Technology, Guilin 541004, China;
3. Department of Electronic Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

**Abstract:** Experimental system for laser-induced acoustic signals was built. Acoustic signal was induced by pulsed laser focusing into water. A hydrophone was used to convert acoustic signals into electric signals. The mathematic model for laser-induced acoustic signals in time domain was analyzed. Energy distribution of laser-induced acoustic signals in frequency domain was studied. The modulation method for communication based on laser-induced acoustic signal was theoretically studied and proved by experiments. The results are as follows: Pulse width of laser-induced acoustic signal is about 20  $\mu\text{s}$ . The laser-induced acoustic signals have most of their energy concentrated within 200 kHz, where half of that is between 100 kHz and 200 kHz. Magnitude modulation and frequency modulation are effective methods in communication based on laser-induced acoustic signal.

**Key words:** laser-induced acoustic signal; optical breakdown; spectrum; acoustic signal

收稿日期: 2014-07-19; 修订日期: 2014-08-21

基金项目: 国家自然科学基金(61461014, 51109217, 51209210)

作者简介: 赵中华(1976-), 男, 高级实验师, 主要从事光通信、单片机技术、数据通信方面的研究。Email: gietzzh@163.com

通讯作者: 辛海燕(1980-), 女, 讲师, 主要从事信号处理、数据通信、嵌入式应用方面的研究。Email: 1725648@qq.com

## 0 引言

高重频红外波段激光束聚焦于水中,当聚焦区域的激光能量密度达到或超过水的击穿阈值时,会引起水介质的光击穿<sup>[1-3]</sup>,光击穿会伴随着等离子体闪光、空泡脉动和声辐射等现象<sup>[4]</sup>。光击穿时等离子体空泡膨胀产生的声波和随后空泡溃灭产生的声波统称为激光声。一种新的利用激光声实现通信的方案设计如下:在空中向水下发射的激光信号,经过激光与水的作用,激光能量转化为在水中传播的声能,水下目标对声信号接收,从而实现由空中至水下的通信过程。这种通信方式,空中利用激光,水中利用声波,激光和声波分别在空气中和水中具有良好的传输性能,两者结合技术优势明显。

近年来,广大学者深入开展了激光声通信研究。其中,美国学者 Blackmon 等<sup>[5-6]</sup>对激光声信号应用于水下通信开展了初步的研究,对激光声信号的产生机理,激光声信号处理,空中利用激光检测声信号等进行了理论和实验研究,并取得了一定的成果;彭水<sup>[7]</sup>对激光声通信传输速率、占用带宽等进行了分析计算,推导了激光声最优重频;宗思光<sup>[8-10]</sup>构建了实验平台,进行了初步的激光声通信实验;刘涛等<sup>[11-12]</sup>设计了用于水下激光声的换能器并进行了相关实验;王晓宇<sup>[13]</sup>研究了深水通信环境下激光声信号的特性。

文中通过进行实验,研究了单个激光声信号的时频域特征,分析了激光声通信过程中的信号调制方式,进行了初步的激光声编码通信实验。研究结果可以推进激光声在水下通信领域中的发展。

## 1 激光声信号数学模型

激光声信号是激光击穿液体介质后产生的爆炸性点声源,该过程涉及到复杂的光声能量转换过程,包含等离子产生、冲击波辐射、空泡脉动等一系列复杂现象。建立激光声信号的精确数学模型是十分复杂的。美国学者 Blackmon 通过进行大量实验,给出了单个激光声信号的经验数学模型<sup>[6]</sup>:

$$P(t) = P_m \exp\left[-\frac{t}{\tau}\right] u(t) + \sum_j P_{Bj} \exp\left[-\frac{t-T_{Bj}}{\tau_{Bj}}\right] u(t-T_{Bj}) \quad (1)$$

式中: $P_m$ 为激光等离子体声信号峰值声压; $\tau$ 为激光等离子体声信号的衰减常数; $P_{Bj}$ 为激光空泡第  $j$  次溃

灭时辐射声波的峰值声压; $\tau_{Bj}$ 为激光空泡第  $j$  次溃灭时辐射声波的衰减常数; $T_{Bj}$ 为激光等离子体声波和第  $j$  个空泡溃灭时声波的时间间隔; $u(t)$ 为阶跃函数。

单个激光声信号的幅频响应为:

$$|P(f)| = \left| \frac{P_m \tau}{1+j2\pi f \tau} + \sum_j \frac{P_{Bj} \tau_{Bj}}{1+j2\pi f \tau_{Bj}} \exp(-j2\pi f T_{Bj}) \right| \quad (2)$$

设定脉冲激光器重复频率  $f_L$ ,令  $T_R=1/f_L$ ,表示两个相邻脉冲激光的时间间隔。每一个脉冲激光都产生一个相应的激光声信号,那么重频为  $f_L$  的脉冲激光器产生的连续  $N$  个激光声信号,等同于单个激光声信号在时域的平移叠加,其数学模型可以表示为:

$$P_N(t) = P(t) + P(t-T_R) + P(t-2T_R) + \dots + P[t-(N-1)T_R] \quad (3)$$

相应的幅频响应可以表示为:

$$|P_N(f)| = \left| \frac{\sin(N\pi f T_R)}{\sin(\pi f T_R)} \right| \left| \frac{P_m \tau}{1+j2\pi f \tau} + \sum_j \frac{P_{Bj} \tau_{Bj}}{1+j2\pi f \tau_{Bj}} \exp(-j2\pi f T_{Bj}) \right| \quad (4)$$

## 2 实验设计

激光声实验测量系统如图 1 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,单脉冲激光能量在 100~700 mJ 可调,在光路中安置了 45°分光镜,对分光后的光束通过激光能量计进行监测。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 2~500 kHz,灵敏度级为 -216 dB(参考值为 1 V/ $\mu$ Pa),水听器与激光击穿点相距 20 cm,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,最后由计算机实现对信号的处理。

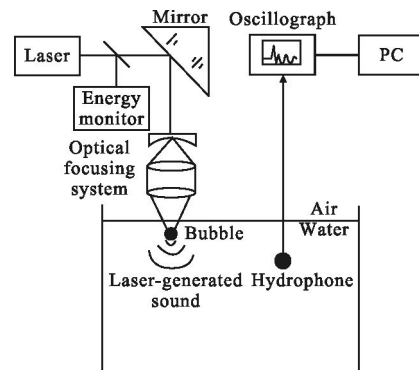


图 1 激光声实验系统图

Fig.1 Experiment system of laser-induced acoustic signal

### 3 实验结果与讨论

#### 3.1 单个激光声信号分析

如图2是水听器接收到的单个激光声信号波形图。图中第一个峰是激光等离子体声信号,是由等离子体爆炸后产生的冲击波衰减得到的,第二、三、四个峰分别是激光空泡第一、二、三次溃灭时辐射的声波。可以看出,四个峰都属于双极性脉冲,具有较强的相似性,脉宽约 $20\mu\text{s}$ 左右。激光空泡在脉动过程中克服周围液体阻力做功,引起能量衰减,其溃灭时辐射的声波峰值声压逐渐减小,同时溃灭周期逐渐缩短。

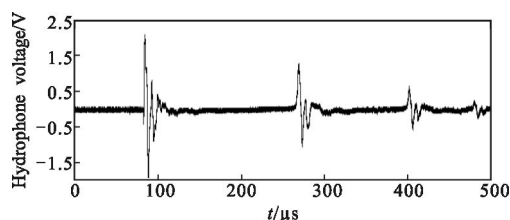


图2 激光声信号时域波形图

Fig.2 Waveform of laser-induced acoustic signal

对图2中的单个激光声信号进行傅里叶变换,得到其频谱如图3所示。可以看出激光声信号的频谱宽度在 $400\text{kHz}$ 左右,这与其在时域窄脉宽特征相对应。频谱峰值间隔在 $6.2\text{kHz}$ 左右,这是由激光声信号前两个峰值之间约 $160\mu\text{s}$ 的时间间隔引起的。

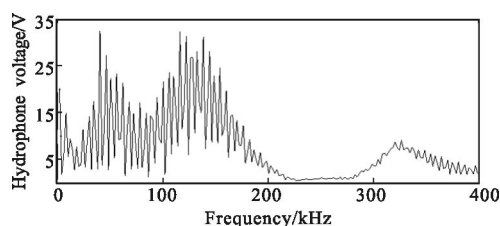


图3 单个激光声信号频谱图

Fig.3 Spectrum of single laser-induced acoustic signal

表1列出了不同激光能量条件下,激光声信号频谱能量分布情况。可以看出,激光声信号约90%的能量集中在 $200\text{kHz}$ 以内。随着激光能量的增加,激光声信号频域能量分布保持稳定,这是由于增加激光能量仅仅提高了激光声信号的峰值声压,但对其脉宽、脉冲上升和下降时间并没有影响。因此,其频谱包络形状未发生明显变化,频域能量分布保持稳定。

表1 激光能量和激光声信号能量分布的关系

Tab.1 Relation between laser energy and laser-induced acoustic signal energy distribution

Laser energy /mJ	Energy ratio (0-100 kHz)	Energy ratio (100-200kHz)	Energy ratio (200-300kHz)	Energy ratio (300-400kHz)
200	41%	52.8%	1.8%	5.4%
300	39.6%	53.3%	1.7%	5.4%
400	41.3%	52.1%	2.1%	5.5%
500	40.5%	52.3%	1.5%	5.7%
600	38.9%	53.1%	2.1%	5.9%
700	40.3%	52.5%	1.9%	5.3%

#### 3.2 激光声信号调制技术分析

激光声通信技术是利用声信号进行信息的传输,由于激光声信号产生过程的特殊性,因此直接对激光声信号进行调制会很复杂。随着激光器设备的日益先进,可以考虑对脉冲激光信号进行控制,进而实现对激光声信号的调制。根据通信调制技术结合目前激光器技术发展状况来看,比较适合激光声通信技术的调制技术主要有幅度调制和频率调制两种。

**幅度调制:**通过控制激光脉冲能量可以实现激光声信号的幅度调制。利用不同能量激光脉冲下产生的激光声信号的峰值差异性,代表不同的码元信息。可以采用开关键控方式实现幅度调制,即利用激光声信号的有无代表不同的编码信息。这种方法的优点是不同码元的差异明显,在信号的接收端误码率低,增加了通信的可靠性。但由于其采用开关键控方式实现调制,在收发双方不能精确同步的情况下,不宜在起始位和终止位发送由无脉冲表示的码元信息。

**频率调制:**由于激光器输出激光脉冲的频率控制较简单,激光脉冲产生频率的变化和激光声信号的产生频率变化相一致。因此对激光声信号进行频率调制有很强的操作性。通过对激光声信号产生频率的控制,使得不同产生频率的激光声信号代表不同的信息,从而实现信号的调制过程。同激光声信号的幅度调制方式相比,由于频率调制方法中一个码元可能需要若干个激光声信号来表示,因此传输同样的信息采用该方法需要更高的功率。但通信起始和终止信息不受限制,这比幅度调制灵活性更强。

激光声通信实验结果如图4所示。其中图(a)、(b)是采用幅度调制的实验结果,用有激光声脉冲表示“1”,无激光声脉冲表示“0”。图(c)、(d)是采用频率

调制的实验结果,用 3 个 6 Hz 激光声脉冲表示“0”, 3 个 3 Hz 激光声脉冲表示“1”。对以上两种调制方式下的码元比较可以看出,在激光器能量稳定的前提下,采用幅度调制虽然在发射功率上具有一定的优势,但由于目前条件下仍无法实现对激光器能量的实时控制,因此幅度变化方式较为单一。在使用幅度调制进行激光声通信时,如果发送的第一个或者最后一个码元是“0”,那么必须分别在信息发射过程中加入起始和结束信号。另外,如果由于激光未能聚焦等原因使激光声信号产生了丢失,若采用幅度调制会引起误码,造成错误的信息传递。而如果使用频率调制方法,因为单个码元由多个激光声脉冲构成,在解调的时候可以采取一定的方法实现对信息的判别、纠正,提高通信的可靠性。通过对以上实验结果进行分析可知,激光声通信的信号稳定,可以准确地对激光声信号的幅度,时间间隔进行控制,进而代表不同的信息,最终实现激光声通信的信息发射过程。

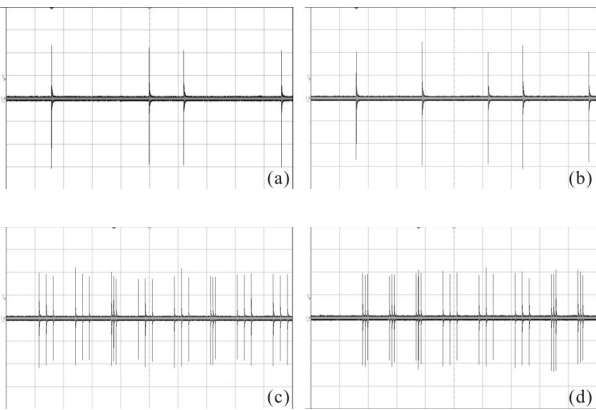


图 4 激光声通信实验结果

Fig.4 Results of laser-induced acoustic signal communication

## 4 结论

通过实验研究了单个激光声信号的特征,分析并实验验证了激光声通信过程中的信号调制方式。研究表明:激光声信号脉宽约  $20 \mu\text{s}$ ,频带宽度约  $400 \text{ kHz}$ ,90%的能量集中在  $200 \text{ kHz}$  内,这其中  $100\sim 200 \text{ kHz}$  内的能量占到的比例大约有 50%;当脉冲激光能量在  $200\sim 700 \text{ mJ}$  范围变化时,激光声信号在频域的能量分布基本保持稳定;激光声通信可以对信号进行幅度调制或频率调制,应用这两种信号调制方式都可以实现信号的准确接收。研究结果可以为激光声水下通信应用提供一定的理论参考。

## 参考文献:

- [1] Berthelot Y. Laser generation of sound by nonlinear thermal expansion, A276955MF [R]. Georgia Institute of Technology School of Mechanical Engineering, 1994.
- [2] 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.
- [3] A Vogel, J Noack, K Nahen, et al. Energy balance of optical breakdown in water at nanosecond to femtosecond time scales[J]. *Appl Phys B*, 1999, 68: 271-280.
- [4] A Vogel, J Noack, K Nahen, et al. Energy balance of optical breakdown in water at nanosecond to femtosecond time scales[J]. *Appl Phys B*, 1999, 68: 271-280.
- [5] F Blackmon, L Antonelli. Remote, aerial, opto-acoustic communication and sonar[C]//SPIE, 2005, 5778: 800-808.
- [6] L Antonelli, F Blackmon. Experiment demonstration of multiple pulse non-linear opto-acoustic signal generation and control[J]. *Applied Optics*, 2005, 44(1): 103-112.
- [7] Peng Shui, Zhang Mingmin, Wang Jiang'an. Improved method for computing underwater acoustic wave induced by laser breakdown [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(4): 1332-1337. (in Chinese)
- [8] 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)
- [9] Liu Tao, Wang Jiangan, Zong Siguang. Experimental investigation on underwater opto-Acoustic communication [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, 653: 143-144.
- [10] 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)
- [11] Liu Tao, Wang Jiang'an, Zong Siguang, et al. Design of underwater target detector by laser-induced sound signal [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(7): 1767-1772. (in Chinese)
- [12] Wang Xiaoyu, Wang Jiang'an, Zong Siguang, et al. A new method for improving characteristic of laser-induced sound [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 32(5): 1449-1453. (in Chinese)
- [13] Wang Xiaoyu, Wang Jiang'an, Zong Siguang, et al. Research on characteristics of the laser-induced bubbles in different surrounding pressures [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 32(3): 239-243. (in Chinese)