

一种采用高重复频率激光进行水声通信的方法

彭 水 张明敏 王江安

(海军工程大学电子工程学院, 湖北 武汉 430033)

摘要 为研究空中平台与水下目标之间的激光声通信技术,提出了一种热膨胀机制下采用高重复频率激光进行水声通信的方法(重复频率法)。理论推导了高重复频率激光产生窄带声信号的过程,并通过实验测量进行了验证。利用高重复频率激光产生了频移键控(n -FSK)和多频移键控(n -MFSK)两种频移键控信号,结合现有激光器的技术指标,针对不同调制信号的水下通信距离、占用带宽、传输速率进行了分析计算,并与现有的方法(长脉冲法)进行了比较。结果表明, n -MFSK 调制的传输速率比 n -FSK 调制的更快,频带利用率更高,但水下通信距离不及 n -FSK 调制;同为 n -FSK 调制,重复频率法的水下通信距离为 1000 m,比长脉冲法高 40%,通信性能优于长脉冲法。

关键词 激光光学;窄带声信号;重复频率法;水声通信

中图分类号 TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0705005

Method of Laser-Generated Sound with High Repetition Rate for Underwater Acoustic Communication

Peng Shui Zhang Mingmin Wang Jiang'an

(College of Electronic Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan, Hubei 430033, China)

Abstract In order to study the technology of optoacoustic communication between aerial platforms and underwater objects, a method of laser-generated sound with high repetition rate for underwater acoustic communication is presented in a thermal expansion mechanism. The narrow-band acoustic signal is calculated and validated by experimental results. n -frequency-shift keying (n -FSK) and n -multiple frequency-shift keying (n -MFSK) modulated signals are generated in this method. The in-water range, bandwidth and data rate are analyzed for different modulation methods based on existing laser technology. The performance of modulation method with high repetition rate is compared with existing method (modulation method with long pulse). The results show that this method can be used for communication of short range. Compared to n -FSK modulation, the performance of n -MFSK modulation is better on data rate but worse on in-water range. The in-water range of modulation method with high repetition rate is 1000 m, which is 40% further than that with long pulse for n -FSK modulation.

Key words laser optics; narrow-band acoustic signal; modulation method with high repetition rate; underwater acoustic communication

OCIS codes 140.3430; 140.3540; 140.6810

1 引 言

空中平台与水下目标之间的通信是近年来国内外水声通信领域热衷研究的一个课题。在传统的飞机对潜通信中,潜艇接收飞机的命令只能定时将其天线伸至水面接收飞机发送的短波信号,这在作战中很容易暴露潜艇,降低了潜艇的作战性能^[1]。而采用吊放声纳的方法需要将换能器浸入水中,从而

限制了通信的灵活性。

新型的空中平台与水下目标之间的通信由机载的激光器向水面发射调制的激光,通过热膨胀或光击穿机制在水下激发声波,声信号遇到水下目标被接收解调完成空中至水下的信息传输^[2]。这种通信方式既能增强水下目标隐蔽性,又不影响空中平台的机动性,为空中与水下目标之间的通信开辟了一

收稿日期: 2012-01-09; **收到修改稿日期**: 2012-03-19

基金项目: 国防武器重点基金(9140A14060207JB11)资助课题。

作者简介: 彭 水(1985—),男,博士研究生,主要从事声学方面的研究。E-mail: jxpx_peng1985@163.com

导师简介: 张明敏(1957—),男,教授,博士生导师,主要从事海洋声学方面的研究。E-mail: zhangmm_hg@126.com

条新的技术途径,具有很好的应用前景。

近几年国内外有关研究机构开展了激光致声技术在水声通信、水下目标探测等领域的研究。文献[3~7]研究了激光空泡产生的冲击波,采用高速摄像机研究了不同实验条件下的激光声信号特征。文献[8~12]探讨了将光击穿声信号应用于水声通信中的优势和难点。这些方法都是基于光击穿机制,虽然能产生较高的声源级,但声信号很难控制,不利于编码传输,而且现有聚焦设备很难把机载激光器发射的光束聚焦到海平面以下。Antonelli等^[13,14]对热膨胀激光声信号用于水声通信进行了较深入的研究,他们采用调制设备对长脉冲激光进行调制产生所需频段的声信号(长脉冲法),并对通信结果进行了分析,但这种方法光声转换效率偏低。

本文提出了一种热膨胀机制下采用高重复频率激光进行水声通信的方法,简称重复频率法。通过控制激光器的重复频率产生调制的声信号,结合现有激光器的技术指标分析了通信性能,并与长脉冲法进行了比较,体现了重复频率法的优势,研究结果对开展激光声在水声领域中的应用有一定的参考价值。

2 热膨胀机理

对于均匀的理想流体(以水为例),热膨胀机制下,激光激发水下声波的光声波方程可描述为

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = -\frac{\beta}{C_p} \frac{\partial H(x, y, z, t)}{\partial t}, \quad (1)$$

式中 p 为声压, c 为水下声速, β 为体膨胀系数, C_p 为水的比热, $H(x, y, z, t)$ 为单位时间吸收并转化为热量的电磁能量密度。文献[14]给出了声压的频域表达式为

$$P(r, \theta, \omega) = -\frac{AI_0\beta a^2}{2C_p} H(\omega) I(\omega), \quad (2)$$

式中

$$H(\omega) = \frac{\exp(jkr)}{r} \frac{\omega^2 \mu \cos \theta}{\omega^2 \cos^2 \theta + \mu^2 c^2} \times \exp\left(-\frac{\omega^2 a^2 \sin^2 \theta}{4c^2}\right), \quad (3)$$

r 为接收点与声源之间的距离, θ 为观测角,即 r 与垂直向下方向的夹角, A 为激光对水面的透射系数, I_0 为光强, a 为光束半径, k 为波数, μ 为水对激光的吸收系数,与激光波长有关, $I(\omega)$ 为激光信号的频谱。

3 高重复频率激光产生窄带声信号

研究表明单个激光脉冲产生的声信号频谱宽,

在水下的衰减、畸变严重,不利于编码传输。因此,需要产生窄带且中心频率可控的声信号,实验中采用高重复频率激光脉冲产生窄带声信号。

3.1 理论推导

假设激光垂直射向水面,激光脉冲串的重复周期为 T , 重复频率为 $f_r = 1/T$, 则脉冲串的频谱可表示为

$$I(\omega) = I_0(\omega) \frac{\sin(N\omega T/2)}{\sin(\omega T/2)} = I_0(\omega) G(\omega), \quad (4)$$

式中 $I_0(\omega)$ 为单个脉冲的频谱,将(4)式代入(2)式可得

$$P(\omega) = -\frac{AI_0\beta a^2}{2C_p} H(\omega) I_0(\omega) G(\omega), \quad (5)$$

式中 $H(\omega)$ 与 μ, a, θ 等参数有关, $G(\omega)$ 中重复周期 T 是可控的,其幅度谱为梳状谱结构,谱峰之间具有谐波关系,相邻谱峰的间距为 f_r 。对于激光器而言,参数 μ 和 a 是固定的, f_r 是可控的,此时问题转化为如何选择 f_r 使得 $p(\omega)$ 的窄带特性最好。选择 f_r 时,希望声信号中心频率处的能量强且高次谐波被抑制。因此,激光器的重复频率需满足

$$20\lg \left| \frac{P(f_r)}{P(f_{\max})} \right| \leq 3 \text{ dB}, \quad (6)$$

$$20\lg \frac{|P(f_r)|}{\max |P(nf_r)|} \geq 3 \text{ dB}, \quad n = 1, 2, \dots \quad (7)$$

式中 $P(f_{\max})$ 为频谱幅度的最大值,(6)式表明声信号在中心频率处的能量与最大值相差 3 dB 以内,(7)式表明高次谐波的幅度至少比中心频率处低 3 dB。

联合(5)~(7)式对 f_r 的范围进行计算。参数设置如下:激光波长 $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$, 水对激光的吸收系数 $\mu = 13.7 \text{ dB/m}$, 光斑半径 $a = 6 \text{ mm}$, $\theta = 75^\circ$, 由此可得

$$12 \text{ kHz} \leq f_r \leq 31 \text{ kHz}. \quad (8)$$

3.2 实验测量

热膨胀激光声实验测量系统框图如图 1 所示。实验采用调 Q Nd:YAG 激光器,激光波长 $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$, 脉冲宽度为 8 ns, 光斑半径为 6 mm, 单脉冲能量在 100~800 mJ 可调。激光器输出的光束经过分光镜后分为两束,其中 2% 的能量进入能量计,以便对每个激光脉冲的能量进行监测;另一束经过棱镜反射垂直入射到水箱。水箱长为 1.2 m, 宽为 0.8 m, 深为 0.7 m, 为了消除水箱内壁的声反射干扰,水箱四壁、箱底安装了橡胶尖劈消声。对激光声信号采用无指向性的高频水听器进行接收,灵敏度为 -210 dB。采用 Agilent54621A 型示波器对水听

器接收到的激光声信号进行采集。

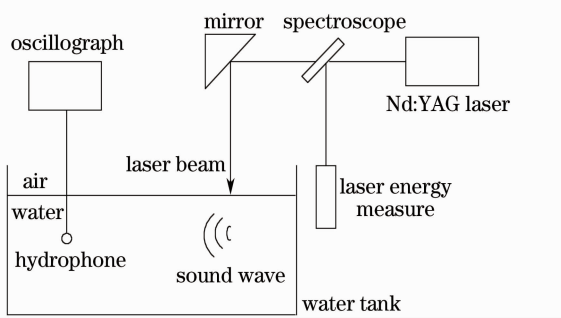


图1 激光声实验测量系统框图

Fig.1 Diagram of experimental system for laser-acoustic

受实验所用激光器重复频率的限制,无法直接得到高重复频率激光产生的声信号。由于相邻激光脉冲产生的声信号具有很好的重复性,采用将单个或多个实验信号按一定重复频率组合的方式得到所需重复频率下的激光声信号。

图2是水听器输出的单个激光声信号,将该信号按 $f_r = 18 \text{ kHz}$ 组合得到的激光声脉冲串如图3所示,脉冲串可表示为

$$s_N(t) = s(t) \sum_{n=0}^{N-1} \delta(t - nT), \quad (9)$$

式中 $s(t)$ 为水听器输出的单个激光声信号。

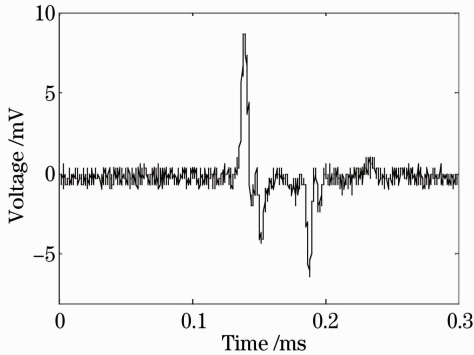


图2 热膨胀激光声信号

Fig.2 Thermoelastic acoustic signal

图4为 $f_r = 18 \text{ kHz}$ 时激光声信号的频谱图,其中图4(a)为根据(5)式得到的计算结果,图4(b)为实验结果,即将图3进行傅里叶变换后得到的结果。从图4可以看出,两者在 18 kHz 处均产生了较好的窄带谱峰,声信号大部分能量集中在 18 kHz 附近,但在二次谐波 36 kHz 处仍有一定能量分布。计算与实验得到的声信号频谱特征基本吻合,验证了理论的准确性。计算和实验结果表明,重复频率为 f_r 的激光脉冲可以产生中心频率为 f_r 的窄带声信号。

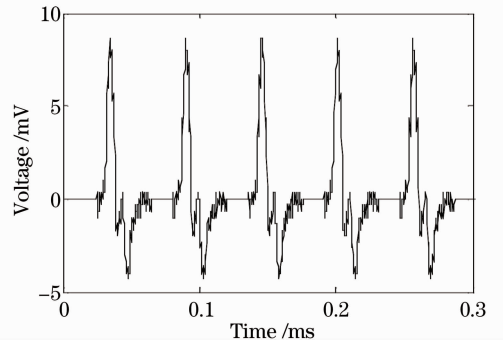


图3 将单个实验信号按 $f_r = 18 \text{ kHz}$ 组合得到的激光声脉冲串

Fig.3 Strain of thermoelastic acoustic signal simulated by single experimental signal for $f_r = 18 \text{ kHz}$

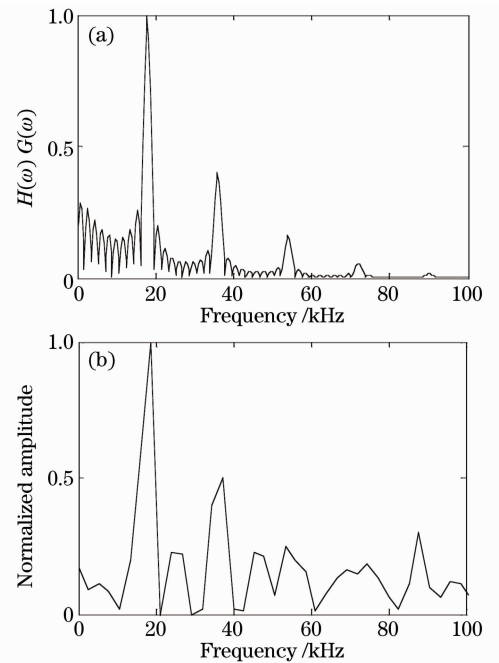


图4 $f_r = 18 \text{ kHz}$ 时的声信号频谱。(a)计算结果; (b)实验结果

Fig.4 Spectrum of acoustic signal for $f_r = 18 \text{ kHz}$. (a) Theoretical result; (b) experimental result

4 产生激光声调制信号

由第3节的分析可知,在一定的重复频率范围内,重复频率为 f_r 的激光脉冲可以产生中心频率为 f_r 的理想窄带声信号。因此,可以通过控制激光器的重复频率使其有规律地变化,从而产生频移键控(FSK)的声信号以搭载信息,实现激光声信号的编码传输。

利用高重复频率激光器产生调频声信号的主要步骤为:首先,根据激光器的光斑半径、激光波长,通过(6)、(7)式确定产生理想窄带声信号的激光脉冲

重复频率范围;其次,在此重复频率范围内选定几个调制频率,由于窄带声信号仍具备一定带宽,应使各频率之间保持一定的间隔,保证调制频率之间不会出现混叠,防止误码;最后,控制激光器的重复频率产生相应中心频率的码元信号。

FSK 信号的产生过程如图 5 所示,FSK 信号又可分为 n -FSK 信号和多频移键控(n -MFSK)信号, n 表示调制频率个数,即 n -FSK 或 n -MFSK 中的 n 。 n -FSK 调制中每个码元只含有一个调制频率,码元总数 $m=n$;而 n -MFSK 调制中每个码元同时含有一个或多个调制频率,码元总数 m 为 2^n 。

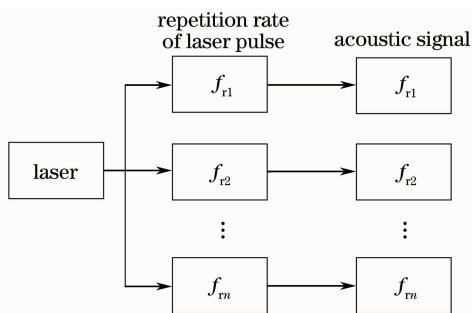


图 5 产生 FSK 信号

Fig. 5 Diagram of generation of FSK

n -FSK 调制中以重复频率为 f_r 的 N 个激光脉冲产生的声信号作为一个码元信号,在一个符号间隔 $(0, T_0)$ 中,码元信号可表示为

$$p_i(t) = \text{Re}\{if_{\text{FFT}}[P(f_{ri})]\}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

式中 $P(f_{ri})$ 可以由(5)式计算得到,于是 n -FSK 信号可以表示为

$$p(t) = \sum_{m=0}^{\infty} p_i(t)g_{\tau}(t - mT_0), \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (11)$$

其中 $g_{\tau}(t - mT_0)$ 为脉宽为 τ , 周期为 T_0 的门函数。

n -MFSK 调制中每个码元含有一个或多个调制频率,单个码元信号可表示为

$$p_{M_i}(t) = \sum_{i=1}^n \cos\left(\frac{n_i\pi}{2}\right)p_i[t - (i-1)\tau], \quad (12)$$

式中 n_i 取值为 0 或 1,取 0 代表该码元含有 f_{ri} 这个调制频率,取 1 代表不包含 f_{ri} 这个调制频率。于是 n -MFSK 信号可表示为

$$p_M(t) = \sum_{m=0}^{\infty} p_{M_i}(t)g_{\tau}(t - mT_0), \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (13)$$

根据(11)、(13)式分别对两种信号进行仿真,参数设置与 3.1 节相同, $n=4, N=40$,由(5)式易得到每个

码元的带宽约为 500 Hz, f_{ri} 根据(8)式取值分别为 15、18、21、24 kHz,保证了码元之间的频谱不会出现混叠。

图 6 为 4-FSK 信号的仿真结果,每个码元可用两位二进制数字表示,码元序列可依次表示为 {00, 01, 10, 11}。

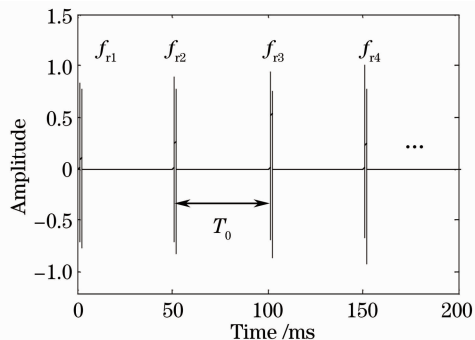


图 6 四阶频移键控激光声信号(4-FSK)

Fig. 6 Laser-generated acoustic signal of 4-FSK

图 7 为 4-MFSK 的仿真结果,每个码元都含有不同的调制频率,第一个码元含有 3 个调制频率,分别为 f_{r1}, f_{r2}, f_{r4} , 记为 f_{r124} , 第二个码元仅含有一个调制频率 f_{r1} , 码元序列可依次表示为 {0000, 0001, ..., 1111}。

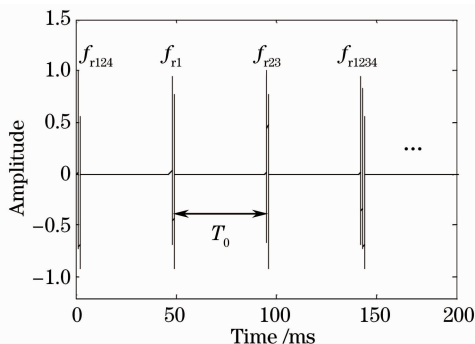


图 7 多进制频移键控信号(4-MFSK)

Fig. 7 Laser-generated acoustic signal of 4-MFSK

5 通信性能

结合现有激光器的技术指标,计算不同调制方法下激光声的水下通信距离、占用带宽和传输速率,分别为

$$X_{\text{SL}} - X_{\text{TL}} - X_{\text{NL}} = R_{\text{SN}}, \quad (14)$$

$$B = \sum_{i=1}^k B_i, \quad (15)$$

$$R_b = \frac{1}{T_0} \text{lb}m, \quad (16)$$

式中 X_{SL} 为声源级, X_{TL} 为声传播损失, X_{NL} 为背景噪声级, R_{SN} 为接收器能检测出信号的最低信噪比。

B_i 为中心频率为 f_{ri} 的码元带宽。

表 1 是重复频率法的通信结果,表 2 是文献 [14] 中长脉冲法给出的通信结果。为了更有效地将这两种方法的通信性能进行比较,表 1 和表 2 的计算结果均是基于以下仿真条件: Nd:YAG 激光器, 波长 $\lambda=1.06 \mu\text{m}$, 光束半径 $a=6 \text{ mm}$, 激光声信号按球面波衰减, 背景噪声取为三级海况, $R_{\text{SN}}=10 \text{ dB}$, 每个码元的带宽约为 500 Hz , 符号间隔 $T_0=50 \text{ ms}$ 。不同之处为重复频率法中激光器输出的最大脉冲能量为 1 J , 脉宽为 100 ns , 最高重复频率可达 50 kHz ; 长脉冲法中激光器输出的最大脉冲能量为 25 J , 脉宽为 2 ms 。

表 1 重复频率法

Table 1 Modulation method with high repetition rate

Modulation method	SL /dB	In-water range /m	Bandwidth / kHz	Data rate / (bit/s)
2-FSK	140	1000	1	20
4-FSK	140	1000	2	40
8-FSK	140	1000	4	60
2-MFSK	137	708	1	20
3-MFSK	134	501	1.5	60
4-MFSK	131	354	2	80

表 1 中, n -FSK 调制时, 2-FSK 信号的声源级 (SL) 为 140 dB , 水下通信距离为 1000 m , 占用带宽为 1 kHz , 传输速率为 20 bit/s 。随着阶数 n 的增加, 声源级保持不变, 占用带宽和传输速率均与 n 呈正比增大。当信号为 n -MFSK 调制时, 2-MFSK 信号的声源级为 137 dB , 比 2-FSK 降低了 3 dB , 水下通信距离减小为 708 m , 占用带宽及传输速率与 2-FSK 信号相同。随着阶数 n 的增加, 声源级和 水下通信距离不断下降, 但传输速率显著增大。声源级下降是由于码元宽度增大导致激光器输出的脉冲能量下降。4-MFSK 信号的带宽为 2 kHz , 传输速率达 80 bit/s , 频带利用率最高。

通过对比表 1 和表 2 可以看出, 当两种方法均为 n -FSK 调制时, 重复频率法与长脉冲法的占用带宽及传输速率相同, 但重复频率法的声源级为 140 dB , 比长脉冲法高 3 dB , 水下通信距离为 1000 m , 比长脉冲法增大了 40% 。

由此可见, 重复频率法中 n -MFSK 调制比 n -FSK 调制的传输速率快, 频带利用率高, n 越大, 优势越明显, 但水下通信距离不及 n -FSK 调制。同为 n -FSK 调制, 重复频率法的水下通信距离大于长脉冲法, 这表明重复频率法的性能更优异。

表 2 长脉冲法

Table 2 Modulation method with long pulse

Modulation method	SL /dB	In-water range /m	Bandwidth / kHz	Data rate / (bit/s)
2-FSK	137	708	1	20
4-FSK	137	708	2	40
8-FSK	137	708	4	60

6 结 论

提出一种利用高重复频率激光脉冲进行水声通信的方法, 推导了高重复频率激光产生窄带声的过程, 并通过实验测量进行了验证。在重复频率法的基础上产生了几种调制信号, 针对不同调制方式的通信结果进行了分析比较, 从分析结果可以看出, n -MFSK 调制比 n -FSK 调制的传输速率快, 频带利用率高, 但水下通信距离不及 n -FSK 调制; 同为 n -FSK 调制, 重复频率法的水下通信距离大于长脉冲法, 通信性能优于长脉冲法。

参 考 文 献

- Liu Cuihai, Wang Wenqing. Key technology and developing trend of foreign navies' submarine communications [J]. *Telecommunication Engineering*, 2011, **51**(7): 187~192
刘翠海, 王文清. 外军潜艇通信关键技术及发展趋势[J]. 电讯技术, 2011, **51**(7): 187~192
- Zong Siguang, Wang Jiang'an. An optoacoustic method for communication between aerial and underwater platforms [J]. *Electronics Optics & Control*, 2009, **16**(10): 75~79
宗思光, 王江安. 空中对水下平台激光声通信技术的探讨[J]. 电光与控制, 2009, **16**(10): 75~79
- T. Kovalchuk, G. Toker, V. Bulatov. Laser breakdown in alcohols and water induced by $\lambda=1064 \text{ nm}$ nanosecond pulses [J]. *Chem. Phys. Lett.*, 2010, **500**(4): 242~250
- T. Jones, A. Ting, L. Bibee *et al.*. Remote Underwater Laser Acoustic Source [P]. US, 7260023B2. 2007-08-21
- Zong Siguang, Wang Jiang'an, Ma Zhiguo. Lighting and shock wave emission of laser cavitation bubble collapse [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(4): 1000~1006
宗思光, 王江安, 马治国. 激光空泡的溃灭发光及冲击波辐射 [J]. 中国激光, 2010, **37**(4): 1000~1006
- Zong Siguang, Wang Jiang'an. Laser breakdown-generated sound in different optical focusing lens systems [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(5): 1384~1390
宗思光, 王江安. 不同光聚焦状态的光击穿声辐射 [J]. 光学学报, 2009, **29**(5): 1384~1390
- Zong Siguang, Wang Jiang'an, Ma Zhiguo *et al.*. Erosion characteristics of laser bubble collapse in the vicinity of a solid boundary [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 885~892
宗思光, 王江安, 马治国 等. 壁面附近激光空泡溃灭的空蚀特性 [J]. 光学学报, 2010, **30**(3): 885~892
- T. Jones, T. Yang, S. Means *et al.*. Airborne Laser-Acoustic Mine Detection System [P]. US, 0088474A1. 2011-04-21
- C. Dimarzio, L. Nieva. Optoacoustic Signal Detection with Coherent Confocal Microscopy [P]. US, 7792570B2. 2010-09-07
- F. Blackmon, L. Antonelli. Remote, aerial, optoacoustic communication and sonar [C]. *SPIE*, 2005, **5778**: 208~213

- 11 Zong Siguang, Wang Jiang'an, Ma Mingkui. Investigation of laser-induced acoustic signal for target detection[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(5): 1332~1337
宗思光, 王江安, 马明奎. 水下目标探测的激光声特性[J]. *中国激光*, 2010, **37**(5): 1332~1337
- 12 Wang Xiaoyu, Wang Jiang'an, Zong Siguang *et al.*. Experimental study on communication using laser-generation 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
- 13 L. Antonelli, F. Blackmon. Laser-Based Method for Docking Unmanned Underwater Vehicle to a Submarine [P]. US, 8047149B1. 2011-11-01
- 14 F. Blackmon, L. Estes, G. Fain. Method for Linear Optoacoustic Communication and Optimization [P]. US, 7505366B1. 2009-03-17

栏目编辑: 王晓琰