

文章编号: 1001-3806(2013)03-0371-05

一种水下激光声通信声源的设计方法

范东洋 张明敏* 彭水

(海军工程大学 电子工程学院, 武汉 430033)

摘要: 单个激光声脉冲具有脉宽窄、频带宽的特点, 不适于远距离水声通信。为了改善激光声通信声源的频谱特性, 提高通信性能, 采用对激光声进行调制的方法, 建立了调制激光声码元的数学模型, 基于该模型, 提出一种调制激光声源的设计方法, 该方法使调制激光声码元频谱的能量集中体现在调制特征的频率上, 降低了信号的频谱宽度, 更利于激光声信号在水声信道中远距离传播; 推导了在热膨胀机制和光击穿机制下调制激光声码元的调制参量, 利用实验获得的热膨胀和光击穿激光声脉冲, 仿真了该方法下的调制激光声码元, 并分析其频谱特征。结果表明, 该声源调制方法是正确和有效的。

关键词: 激光技术; 激光声通信; 调制声源; 激光声码元

中图分类号: TB57 文献标识码: A doi: 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2013.03.023

A source design method for underwater laser-acoustic communication

FAN Dong-yang, ZHANG Ming-min, PENG Shui

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

Abstract: A single laser-acoustic pulse is not available in long distance underwater acoustic communication due to its spike pulse and wide frequency spectrum. To improve the spectrum of the laser acoustic signal, and improve its communication performance, the source was modulated. The mathematical model for modulated laser-acoustic code element was established, a source design method for underwater laser-acoustic communication was presented based on the model. The energy of the code element modulated by the method was concentrated at the frequency that represents the modulation, and the band of the signal was reduced, which made it transmit a further distance in underwater acoustic channel. The modulating parameters of code element induced by laser breakdown and thermoelastic mechanism were calculated. The code element modulated with the method was simulated based on laser signals collected in experiments, whose frequency spectrum proved the validity and the serviceability of the method.

Key words: laser technique; laser-acoustic communication; modulated sound source; laser-acoustic code element

引言

空中激光平台发射的激光作用于水面会产生激光声信号, 这种发声方式具有激发方式机动灵活的优点, 作为水声声源的一种激发方式, 有着广阔的应用前景。

根据激光能量的不同, 照射于水面的激光激发声波主要有3种机制: 热膨胀、气化、光击穿。目前, 国内外对光声转换机制和激光声源的性质有着广泛的研究^[1-3]。单个激光声脉冲的信号形式, 产生过程

和信号特征已经被大量推导和验证^[4-5]。

随着激光器性能的改进, 激光声在水声通信领域的应用受到了一定的重视。BLACKMON等学者对激光声通信方式和性能进行了研究^[6-7], 提出通过采用调制激光器的方式产生窄带调制声源。基于对窄带激光声信号的设计, 参考文献[8]中将产生适于水声通信的窄带激光声信号作为研究的重点并通过重频法设计了一种窄带热膨胀激光声信号。

为了研究可用于水下通信的激光声源, 参考文献[9]中设计了一种激光声换能器, 并将其作为通信声源, 对激光声信号的调制方式进行了探讨。本文中建立了调制激光声码元的数学模型, 就如何通过控制码元宽度和重复频率产生具有较好调制特性的激光声源进行了数学推导, 在该基础上, 利用实验中采得的热膨胀和光击穿激光声脉冲对该设计方法

作者简介: 范东洋(1988-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水声信号处理技术与应用。

* 通讯联系人。E-mail: zhangmm_hg@126.com

收稿日期: 2012-08-13; 收到修改稿日期: 2012-09-11

的有效性进行验证。

1 激光声源特性和调制原理

激光照射于水面有3种声激发方式:热膨胀、气化和光击穿。对于这3种机制产生的声脉冲已经具有较完备的数学模型,并从实验中得到了验证。3种机制下激光脉冲产生声脉冲的特点,所需激光器的能量以及转换效率如表1所示^[9-11]。

Table 1 Performance comparison of laser acoustic pulse of different mechanism

inductive mechanism	thermoelastic	vaporization	laser breakdown
pulse source level/dB	135	>140	>180
pulse width/ μ s	40	>40	20
linear or nonlinear	linear mechanism	both	nonlinear mechanism
conversion efficiency	less than 0.01%	1%	10%~30%
pulse repeatability	better	ordinary	worse

与常规水声通信声源相比,单个激光声脉冲的声源级较小,信号的频带较宽,并不适合远距离水声通信。通过控制激光器,可以在水下产生调制的激光声信号,调制激光声的能量、频谱特性得到极大的改善,更适于水声通信。

激光声通信系统框图如图1所示。图1中的基带信号是单极性数字信号,驱动激光器产生不同频率的激光脉冲代表不同的信号状态,当调制激光脉冲照射于水面时,产生的激光声信号可体现此调制频率^[6],可用来表示基带信号的每种码元状态。存在一个不发信号的状态,若以此状态表示一个码元状态,以一定频率调制激光声信号代表另一个码元状态,则该通信系统为二进制振幅键控(2 amplitude shift keying, 2ASK)调制通信系统;若忽略不发信号的状态,直接以不同频率的调制激光声信号表示不同的码元状态,则该通信系统为频移键控(frequency shift keying, FSK)调制通信系统。两种通信系统的声源的基本形式都为一定码元宽度和一定调制频率的激光声信号,本文中以一个调制激光声码元为研

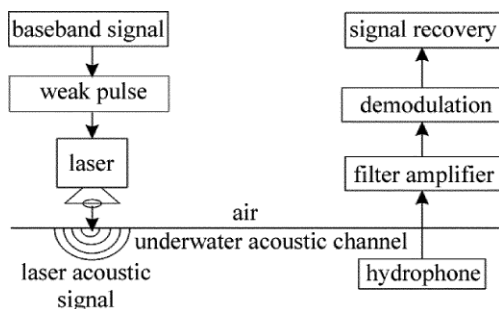


Fig. 1 The diagram of laser acoustic communication system

究对象进行分析。

2 激光声通信声源的设计

2.1 激光声码元的数学模型

调制激光声信号是由连续的一系列调制激光声码元组成,调制激光声码元的时频特征即体现了调制激光声信号的特征。调制激光声码元的产生过程可抽象为如下过程:单个激光声脉冲与一定频率的冲激函数卷积,然后通过一个宽度与码元宽度相同的矩形窗函数。将单个激光声脉冲的声压函数用 $p(t)$ 表示,其频谱函数设为 $p(f)$,冲激函数记为 $\delta_f(t)$,窗函数记为 $d_T(t)$,则调制激光声码元的函数可表示为^[12]:

$$s(t) = d_T(t) p(t) * \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta_f(t - n/f_0) \quad (1)$$

式中,*表示卷积, n 为冲激函数的个数, f_0 为冲激串函数的脉冲重复频率, T 为矩形窗函数的宽度。

(1)式化简后可表示为:

$$s(t) = d_T(t) \sum_{n=-\infty}^{+\infty} p(t - n/f_0) \quad (2)$$

矩形窗函数的傅里叶变换为 sinc 函数,因此,(2)式的傅里叶变换为:

$$S(f) = 2\pi f_0 \sum_{n=-\infty}^{+\infty} p(f - nf_0) * \text{Texp}(-j\pi f T) \text{sinc}(\pi f T) \quad (3)$$

上式化简后取实部可得:

$$S(f) = 2\pi f_0 T \sum_{n=-\infty}^{+\infty} p(f - nf_0) * \text{sinc}(\pi f T) \quad (4)$$

(4)式即为调制激光码元的频谱函数。

调制激光码元的频谱图如图2所示。由(4)式和图2可以看出调制激光码元频谱的如下特点:

(1) 调制激光声码元的频谱的数学模型等于单个激光声脉冲频谱的采样与函数的卷积,其中采样频率与码元的调制频率相等;调制激光码元的频谱在形状上为多个函数叠加的结果,相邻两个 sinc 函数主瓣之间的间隔与调制频率相等;(2) 调制激光码元的频谱由多个谱峰组成,每个 sinc 函数的主瓣形成相应谱峰,当码元宽度较大时,谱峰宽度较小,谱峰受相邻 sinc 函数的旁瓣幅度影响较小,使码元的频谱呈现一定的线谱特征,其频谱如图2a所示;当码元宽度较小时,谱峰宽度较大,谱峰受相邻 sinc 函数的旁瓣影响较大,码元的频谱呈现一定的梳状谱结构,其频谱如图2b所示;(3) 不考虑相邻函数旁

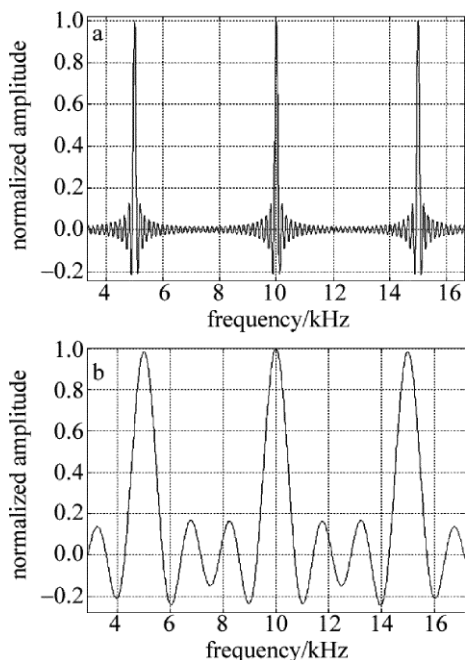


Fig. 2 Spectrum of acoustic modulated signal

a—modulated of 5kHz and code width 4ms b—modulated of 5kHz and code width 0.4ms

瓣幅度的影响,调制激光声码元频谱的每个谱峰在幅度上与单个激光声脉冲频谱在谱峰中心频率处幅度和调制频率成正比;相邻谱峰之间的频率间隔一定,等于调制频率。

调制激光声码元频谱的能量集中在每个谱峰中,通信信息包含在谱峰中,谱峰的频带越窄,能量越高,信号的通信性能越好,通信可靠性越高。然而,码元宽度会对激光声通信系统的通信速率产生影响。在理想信道条件下,二进制码元通信系统的通信速率为:

$$K = 1/T \tag{5}$$

码元宽度与通信系统的通信速率成反比,码元宽度过大将对系统的通信速率产生严重影响。因此,对调制激光声码元的脉冲宽度和调制频率的选取,要兼顾调制激光声码元的窄带特性和系统的通信速率,在保持其窄带特性的前提下选择适当的码元宽度和重复频率,以便在不损失通信可靠性的基础上提高通信速率。

2.2 激光声码元的设计

调制激光声码元频谱中,相邻的两个窄带主瓣之间间隔为信号的调制频率 f_0 。假设码元宽度无限宽,相邻两个窄带之间不产生主旁瓣干扰,则第 n 个窄带可用下式描述:

$$S_n(f) = 2\pi f_0 T p(nf_0) \text{sinc}[\pi T(f - nf_0)] \tag{6}$$

将(6)式主瓣移至 $f=0$ 处,可得:

$$S_n(f + nf_0) = 2f_0 p(nf_0) \frac{\text{sinc}(\pi T f)}{f} \tag{7}$$

不考虑相邻 sinc 函数旁瓣的影响,由(7)式可知,调制激光声码元频谱的第 n 个谱峰的波形由下式决定:

$$F_n = \frac{\text{sinc}(\pi T f)}{f} \tag{8}$$

由(8)式可以得出如下结论:(1)在中心频率处,(8)式取得最大值 πT ,称为(8)式的主瓣^[13];当 $\pi T f = \pi/2 + 2k\pi$ ($k=1, 2, 3, \dots$)时,即 $f = (1 + 4k)/(2T)$ 时,(8)式取得极大值,称为(8)式是第 n 个窄带的第 k 个旁瓣, k 较大时,旁瓣的能量逐渐降低;(2)(8)式第 k 个旁瓣的频率为 $f = (1 + 4k)/(2T)$ ($k=1, 2, 3, \dots$)。增大码元宽度会使主瓣和旁瓣宽度变窄,对调制激光码元频谱造成的影响是相邻两个谱峰之间旁瓣数量增多,如图2所示。

当码元宽度较小时,假设第 n 个谱峰与第 $(n-1)$ 和第 $(n+1)$ 个谱峰的第 k 个旁瓣相互叠加,谱峰受第 k 个旁瓣影响为:

$$S_k = 10 \lg \left[\frac{4}{(1 + 4k)\pi} \right] \quad (k = 1, 2, 3, \dots) \tag{9}$$

随着码元宽度的增大,调制激光声码元频谱的多个谱峰和旁瓣的宽度变小,相邻谱峰之间旁瓣的数目增大,由(9)式可知, k 越大,旁瓣对谱峰的影响降低。调制激光声码元频谱谱峰的带宽越窄,单个谱峰能量越高,其通信可靠性就越高。在调制激光码元中,包含通信信息的主要是谱峰,其带宽与码元宽度成反比,对于不同的调制频率,存在一个临界码元宽度使得码元宽度大于该临界值时,谱峰的带宽满足一定的窄带特性。

远距离水声信道要求信号的频谱满足一定的带宽。当调制激光码元频谱的相邻谱峰之间距离为7个旁瓣宽度时,调制频率大小为谱峰的宽度的3.5倍。

由此可以得出,码元宽度和激光声脉冲重复频率应满足的关系为:

$$\begin{cases} kf_0 \approx f_m \quad (k = 1, 2, 3, \dots) \\ f_0 T \geq 14.5 \end{cases} \tag{10}$$

此时,调制激光声码元频谱的谱峰的带宽为 $2f_0/7$;相邻谱峰的旁瓣对谱峰的干扰为 -12dB ,信号频谱的谱峰带宽较窄,信号的频谱呈现较好的线谱特性,具有较好的调制特性。

3 实验数据分析

3.1 热膨胀机制情况

由表1可知,热膨胀机制下的激光声脉冲需要的激光能量密度较低,且该机制下光声转换过程中水未发生形态变化,属于线性变化,因此,热膨胀机制激光声脉冲重复性较好且对激光器的能量要求较低,以现有的激光技术,热膨胀机制下的激光声脉冲重复率可达40kHz,基于热膨胀机制的激光声信号具有良好的调制特性^[14]。

在实验中采得的单个热膨胀激光声脉冲,计算其频谱图如图3所示。

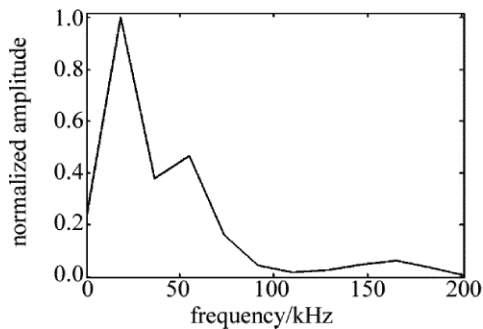


Fig. 3 Spectrum of single laser acoustic signal by thermoelastic mechanism

由图3可知,单个热膨胀激光声脉冲频谱的中心频率大约在 $f_0 = 18.35\text{kHz}$ 附近。对于该信号,依据(10)式,调制频率应设在如下频率处:

$$f_0 = f_m/k \quad (k = 1, 2, 3, \dots) \quad (11)$$

为了不失一般性,取 $k = 3$,带入(10)式得到在调制激光声码元频谱中相邻窄带之间主旁瓣干扰小于-10dB时的最佳码元宽度为 $T = 2.4\text{ms}$ 。按照该调制频率和码元宽度得到热膨胀调制激光声码元,利用MATLAB计算出该信号的频谱图如图4所示。

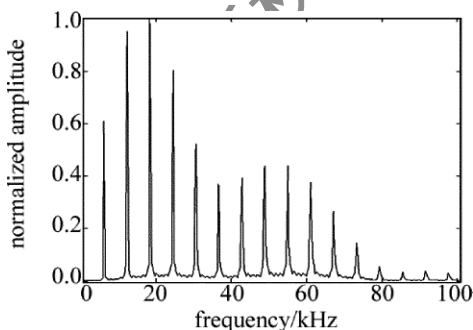


Fig. 4 Spectrum of modulated laser acoustic signal by thermoelastic mechanism

由图4可知,调制频率为 $f_0 = 6.12\text{kHz}$,码元宽度为 $T = 2.4\text{ms}$ 时的激光声的频谱呈线谱特性,信号的能量集中在调制频率和其谐波上;能量最高的谱峰的中心频率为 $f_0 = 18.33\text{kHz}$,与单个激光声信号频谱的中心频率非常接近。这表明基于热膨胀机制,依照

(10)式选取调制频率和码元宽度,调制激光声码元频谱呈现较好的线谱特性,信号的能量集中在每根“线谱”上,提高了有用频带内信号的能量。

3.2 光击穿机制情况

在光击穿机制光声转换过程中水发生了形态改变,激光器的能量密度需要超过水的击穿阈值,对激光器的能量要求较高。由于该机制属于一种非线性的转化过程,所获得的声信号的重复性较差。与热膨胀机制相比,光击穿机制下信号重复频率和稳定性较差,以现有的激光技术,光击穿机制下激光声信号的重复频率最高可达2kHz;但光击穿机制光声转换效率较高,产生的声信号声源级比热膨胀机制高,经过线性调制适于在远程水声通信中应用。实验中采集到光击穿机制下单个激光声脉冲,计算其频谱图如图5所示。

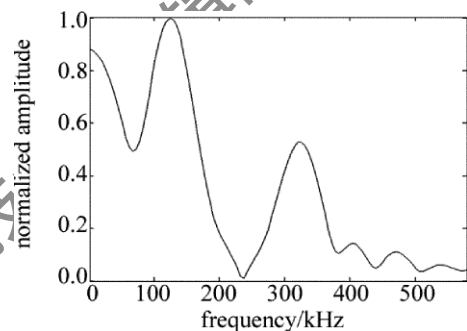


Fig. 5 Spectrum of single laser acoustic signal by laser breakdown

由图5可知,光击穿机制下单个激光声信号的频谱范围较宽,幅度极大值点较多。受激光技术的限制,光击穿机制下调制激光码元的调制频率远小于单个激光脉冲频谱的中心频率。因此,激光器的调制频率应选取激光器能达到的最好脉冲波形重复情况下的最高调制频率。

在光击穿机制下,激光器的最大重复频率约为2kHz,本文中取重复频率 $f_0 = 1\text{kHz}$,将该频率带入(10)式,得到满足(10)式的光击穿机制调制激光声码元的码元宽度为 $T = 14.5\text{ms}$ 。按照该参量得到光击穿机制下的调制激光声码元,计算其频谱图如图6所示。

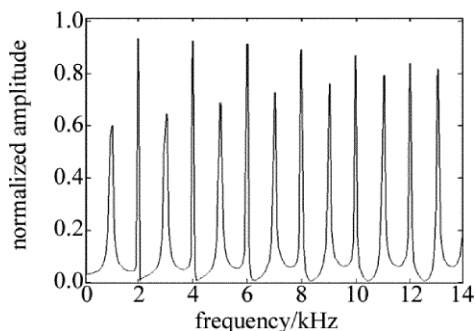


Fig. 6 Spectrum of modulated laser acoustic signal by laser breakdown

由图6可知,光击穿机制调制激光声码元的频谱中,由于调制频率较小,信号的能量分布的频率范围较广;码元频谱呈现梳状特性,信号的能量分布在调制频率和其高次谐波上,每个谱峰幅度受单个激光声脉冲频谱在该频率处的幅度影响较大。在一定的频带范围内,包含通信信息的成分幅度较大。在频率较低的情况下,光击穿机制下调制激光声码元的频谱中谱峰的能量仍然较高,随着激光技术的发展,若可以提高该机制下激光器的重复频率,则基于光击穿机制的线性调制通信系统的性能有较大的提升空间。

4 结论

基于线性调制激光声信号的水声通信系统对声源的调制采用2ASK或FSK的形式^[15]。作者推导了线性调制激光声源的数学模型,在满足调制激光声码元的窄带特性的基础上设计了一种调制频率和码元宽度选择方案。

(1) 热膨胀机制调制激光码元的调制频率的选择满足的原则为:调制频率或其倍数应在单个激光声信号中心频率上或其附近,以保证通信信号频谱中的有效成分的能量尽可能大。

(2) 光击穿机制调制激光声码元的调制频率选择准则为:选取激光器能达到的最好脉冲波形重复情况下的最高调制频率。

(3) 线性调制激光声通信码元宽度同时影响着通信系统的通信速率和通信可靠性,应在保证码元的频谱的线谱特征或梳状谱特征的前提下,尽量减小码元宽度。

(4) 利用实验采得的热膨胀机制和光击穿机制下的激光声脉冲仿真出最优调制参量下的调制激光声码元的频谱波形,证明了该调制频率和码元宽度选取准则的正确性和实用性。

利用实验中采得的热膨胀机制和光击穿机制下的激光声脉冲仿真出最优调制参量下的调制激光声码元的频谱波形,证明了该调制频率和码元宽度选

取准则的正确性和实用性。

参 考 文 献

- [1] WANG Y H, WANG J A, MA Zh G. Analysis of the laser induced sound[J]. *Laser & Infrared*, 2009, 39(5): 477-479 (in Chinese).
- [2] CHEN Q M, CHENG Z H. Research of laser acoustic effect in liquid[J]. *Laser & Infrared*, 2006, 36(8): 623-626 (in Chinese).
- [3] YU Y, WANG J A, JIANG X Zh. The study of theory of directivity of laser-induced sound radiating field in water[J]. *Laser & Infrared*, 2007, 37(1): 26-31 (in Chinese).
- [4] ZONG S G, WANG J A, WANG Y H. Laser-acoustic source characteristic and its application in ocean[J]. *Applied Optics*, 2008, 29(3): 408-411 (in Chinese).
- [5] CHEN Q M. Research of acoustics induced by pulsed CO₂ laser in water[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2009: 9-11 (in Chinese).
- [6] BLACKMON F, ANTONELLI L. Remote, aerial, opto-acoustic communication and sonar[J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5778: 208-213.
- [7] BLACKMON F, ESTES L, FAIN G. Linear optoacoustic underwater communication[J]. *Applied Optics*, 2005, 44(18): 3383-3845.
- [8] PENG Sh, ZHANG M M, WANG J A. Research on generation of narrow-band acoustic signals based on thermoelastic mechanism[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2012, 23(5): 885-890 (in Chinese).
- [9] ZONG S G, WANG J A. An opto-acoustic method for communication between aerial and underwater platforms[J]. *Electronics Optics & Control*, 2009, 16(10): 75-79 (in Chinese).
- [10] WANG Y H, WANG J A, WU R H. Design of a laser induced sound transceiver sonar transducer[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2009, 30(11): 1306-1310 (in Chinese).
- [11] PENG Sh, ZHANG M M, WANG J A. Improved method for computing underwater acoustic wave induced by laser breakdown[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(4): 0402003 (in Chinese).
- [12] FAN Ch X. Lectures on communication principles[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005: 120-133 (in Chinese).
- [13] HU G Sh. Digital signal processing[M]. Beijing: Publishing House of Tsinghua University, 2003: 94-115 (in Chinese).
- [14] TIAN Z X, GENG S, LIU Y Q, et al. Laser induced sound in water[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2004(11): 15-19 (in Chinese).
- [15] MA Y, JI H, LIANG K, et al. Application of modulated lidar on optical carrier for ocean exploration[J]. *Laser Technology*, 2008, 32(4): 346-349 (in Chinese).