

## 基于n-MFSK调制的激光致声空-水跨介质通信方法

黄金鑫, 周志权, 曹逸飞, 赵扬

### Method of laser-generated sound with $n$ -MFSK modulation for air-water trans-media communication

引用本文:

黄金鑫, 周志权, 曹逸飞, 赵扬. 基于n-MFSK调制的激光致声空-水跨介质通信方法[J]. *激光技术*, 2024, 48(1): 8-13.

HUANG Jinxin, ZHOU Zhiquan, CAO Yifei, et al. Method of laser-generated sound with  $n$ -MFSK modulation for air-water trans-media communication[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2024, 48(1): 8-13.

## 您可能感兴趣的其他文章

### 1. 一种多波长多编码合束输出的新型激光源研究

引用本文: 郑雅文, 陈国胜, 陈文建, 等. 一种多波长多编码合束输出的新型激光源研究[J]. *激光技术*, 2023, 47(5): 632-638.

### 2. 固体微片Nd : YAG激光器的偏振跳变效应研究

引用本文: 陈浩楠, 邓勇, 张书练. 固体微片Nd : YAG激光器的偏振跳变效应研究[J]. *激光技术*, 2023, 47(5): 627-631.

### 3. 孔径接收下各向异性海洋湍流UWOC系统误码分析

引用本文: 贺锋涛, 王清杰, 张建磊, 等. 孔径接收下各向异性海洋湍流UWOC系统误码分析[J]. *激光技术*, 2021, 45(6): 762-767.

### 4. 分布式反馈激光器调制特性研究

引用本文: 王海旭, 陈建冬, 常天英, 等. 分布式反馈激光器调制特性研究[J]. *激光技术*, 2017, 41(6): 836-840.

### 5. 基于级联马赫-曾德尔调制器的太赫兹通信系统

引用本文: 和亮. 基于级联马赫-曾德尔调制器的太赫兹通信系统[J]. *激光技术*, 2016, 40(6): 787-790.

文章编号: 1001-3806(2024)01-0008-06

## 基于 $n$ -MFSK 调制的激光致声空-水跨介质通信方法

黄金鑫<sup>1</sup>, 周志权<sup>1</sup>, 曹逸飞<sup>1</sup>, 赵 扬<sup>1,2\*</sup>

(1. 哈尔滨工业大学(威海)信息科学与工程学院, 威海 264209, 中国; 2. 威海市智能光声检测与传感技术重点实验室, 威海 264209, 中国)

**摘要:** 为了改善空中平台和水下目标之间的激光致声通信技术, 采用了一种多进制多频移键控( $n$ -MFSK)调制方式来提升激光致声空-水跨介质通信速率的方法。在借助激光致声热膨胀效应实现空-水界面处的光声转换基础上, 分别采用长脉冲法和重复频率法进行了调制及仿真验证, 得到了在调制频率数量为 2 的情况下, 2-MFSK 调制可在 2-FSK 调制基础上将通信速率提高 1 倍的结果。结果表明, 长脉冲法主要通过激光阵列结合频率叠加的方式实现  $n$ -MFSK 调制, 重复频率法则通过控制激光器频率变化进而在时域上以分配时间段的方式实现  $n$ -MFSK 调制; 随着调制频率数量增加, 相对于  $n$ -FSK 调制,  $n$ -MFSK 调制下通信速率更高, 并可改善频带利用率, 但声压级和水中传输距离会随符号码元持续时间内调制频率数量增加而减小。该研究为未来激光致声空-水跨介质通信实际应用提供了参考。

**关键词:** 光通信; 激光致声; 多进制多频移键控; 热膨胀效应; 长脉冲法; 重复频率法

中图分类号: TN249; TN911.3; TN914.2 文献标志码: A doi:10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2024.01.002

### Method of laser-generated sound with $n$ -MFSK modulation for air-water trans-media communication

HUANG Jinxin<sup>1</sup>, ZHOU Zhiquan<sup>1</sup>, CAO Yifei<sup>1</sup>, ZHAO Yang<sup>1,2\*</sup>

(1. School of Information Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Weihai, Weihai 264209, China; 2. Weihai City Key Laboratory of Photoacoustic Testing and Sensing Technology, Weihai 264209, China)

**Abstract:** In order to improve the laser acoustic communication technology between air platforms and underwater objects, the  $n$ -multifrequency shift keying ( $n$ -MFSK) modulation method was proposed to further enhance the laser acoustic air-water cross-media communication rate. Based on the thermal expansion effect of laser acoustic, the modulation methods of the long-pulse-duration laser method and the high repetitive rate method were defined and simulated. The result was obtained that 2-MFSK modulation doubles the communication rate on top of 2-FSK modulation for a modulation frequency number of 2. The  $n$ -MFSK modulation was achieved by the long-pulse-duration laser method, mainly through the laser array by means of frequency superposition, and the high repetitive rate method by controlling the allocation of time periods on the time domain of the laser frequency change. The results show that as the number of modulation frequencies increases,  $n$ -MFSK modulation can increase the communication rate and improve the band utilization relative to  $n$ -frequency shift keying ( $n$ -FSK) modulation at the cost of loss of the sound pressure level (SPL) and in-water-range. This study provides a reference for the practical application of laser acoustic air-water cross-media communication in the future.

**Key words:** optical communication; laser acoustics;  $n$ -multifrequency shift keying; thermal expansion effect; long-pulse-duration laser method; high repetitive rate method

## 0 引 言

天空地海潜一体化通信在军事力量储备和国民经济生产中的地位日益突出, 其中空中平台和水下目标

之间的通信技术是构建天空地海潜一体化通信的重要组成部分。在现有的空海通信方案中, 潜行接收飞机的信息一般分为上浮延展天线和飞机投放中继浮标两种方式<sup>[1-2]</sup>, 但这两种方式在实际应用中存在暴露目标的可能性, 从而降低了潜行器的隐蔽性。

激光致声空-水跨介质通信通过热膨胀或光击穿机制在水气交界面进行光声转换, 可以将激光在空气信道和声波在海洋信道的传输优势结合起来, 摆脱空-

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52275524); 山东省重点研发计划资助项目(2021ZLGX05)

\* 通信作者: zhaoyang@hit.edu.cn

收稿日期: 2022-12-06; 修回日期: 2023-02-13

水界面的限制<sup>[3-13]</sup>。该通信方式具有无需在介质中部署任何物理换能器及中继器的特点,增强了通信目标的隐蔽性,是未来空中平台与水下目标之间通信的重要方式之一。

自 1962 年前苏联 PROKHOROV 和美国 WHITE 的研究团队先后发现了浓缩介质在脉冲激光的作用下产生声波的现象以来,国内外相关机构逐步开展光声转换技术在水下目标探测、空-水跨介质通信等领域的研究工作<sup>[14-15]</sup>。BLACKMON 等人<sup>[16-18]</sup>从理论上对激光致声的线性特性和非线性特性进行了分析与研究,并从实验角度验证了该技术在通信领域的应用可行性。研究发现:激光致声的非线性特征受环境干扰较大,实际情况下阈值难以控制,不利于保持通信过程的可靠性。因此,目前研究多利用激光致声的线性特性,即根据激光致声热膨胀效应来进行空中-水下跨介质通信,例如 ANTONELLI 等人基于该效应根据所需的声波频段,调制长脉冲激光并实现了通信功能<sup>[19]</sup>。此外,PENG 等人<sup>[20]</sup>基于该效应提出了一种控制激光器重复频率进而实现空中-水下跨介质通信的方法。

本文作者在上述研究的基础上,依次针对激光致声空中-水下跨介质通信速率的需求,提出了一种多进制多频移键控( $n$ -multifrequency shift keying,  $n$ -MFSK)调制方式的激光致声空-水跨介质通信方法,分别在采用长脉冲法和重复频率法的调制方式基础上,结合现有激光器的关键技术参数,通过仿真计算对通信速率的提升效果进行了评价与分析,为激光致声在空中-水下跨介质通信领域中的应用提供了一定的参考依据。

## 1 热膨胀机制

液体中的激光致声,即在液体中激光能量达到一定强度激发产生声波的过程。根据激光相互作用区域的能量密度与时空分布,可把液体中光声效应机制主要分为热膨胀、汽化与光击穿 3 种。与汽化机制和光击穿机制相比,热膨胀机制物理过程简单,实验上容易实现。相对于另外两种致声机制,热膨胀机制致声原理的研究相对比较成熟,本文中关于液体中激光致声空-水跨介质研究将针对热膨胀机制进行。

在热膨胀机制下,假设液体为均匀的理想流体,激光激发水下声波的转换方程<sup>[21]</sup>:

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

其中:

$$s = (\alpha c^2 \beta E_0 / c_p) \cdot \exp(-\alpha z) \quad (2)$$

$$\beta = -\frac{1}{\rho_0} \left( \frac{\partial \rho_0}{\partial T} \right) \quad (3)$$

式中: $s$  为声压; $c$  为声速; $x, y, z$  为空间坐标方向距离; $t$  为时间; $\alpha$  为水的吸收系数; $E_0$  为表面激光能量密度; $c_p$  为单位质量定压比热容; $\mathbf{H}(x, y, z, t)$  为单位时间内液体吸收并进行能量转化的电磁能量密度; $\beta$  为液体的体积热膨胀系数( $\rho_0$  为密度,  $T$  为温度,假设  $T$  在过程中不变,  $\beta$  为常数)。由参考文献[16],将式(1)傅里叶变换取实部,得到其激光垂直入射表达式为:

$$s(r, \omega) = -\frac{A I_0 \beta a^2}{2c_p} E(\omega) I(\omega) \quad (4)$$

其中,

$$A = 1 - \left[ \frac{n_2 \cos i - n_1 \cos \phi}{n_2 \cos i + n_1 \cos \phi} \right]^2 \quad (5)$$

式中: $r$  为接收点与声源之间的距离; $\omega$  为频率; $A$  为给定激光偏振情况下激光对液体的透射率; $i$  为入射角; $\phi$  为折射角; $n_1$  为空气中的折射率; $n_2$  为液体中的折射率; $I_0$  为光强; $a$  为光束半径; $I(\omega)$  为激光频谱; $E(\omega)$  为单位时间吸收并转化为热量的电磁波能量密度频谱,可表示为:

$$\begin{cases} E(\omega) = \frac{\exp(ikr)}{r} \frac{\omega^2 \tau_0}{1 + \omega^2 \tau_0^2} \exp\left(-\frac{\omega^2 \tau_1^2}{4}\right) \\ \tau_0 = \cos \theta / (\mu c) \\ \tau_1 = a \sin \theta / c \end{cases} \quad (6)$$

式中: $k$  为波数,与激光波长有关; $\mu$  为水对激光的吸收系数; $\theta$  为观测角,即  $r$  与垂直向下方向的夹角; $\tau_0$  为垂直特性延迟时间; $\tau_1$  为水平特性延迟时间。

## 2 $n$ -MFSK 调制

$n$ -MFSK 调制是在多进制频移键控( $n$ -frequency shift keying,  $n$ -FSK)调制基础上,进一步提高通信速率并改善误比特率。本文中针对激光致声空-水跨介质

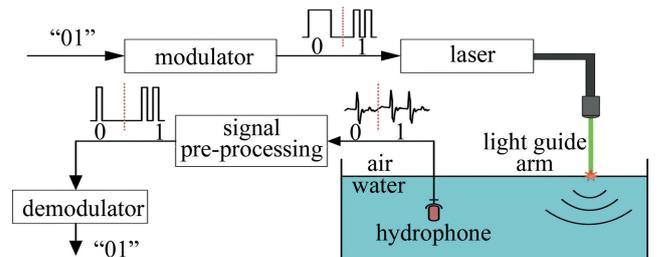


图 1 激光致声通信调制解调原理图

Fig. 1 Modulation and demodulation principles diagram for laser induced acoustic communication

长脉冲法和重复频率法,提供  $n$ -MFSK 调制方案,整体激光致声通信原理图如图 1 所示。

## 2.1 长脉冲法 $n$ -MFSK 调制

长脉冲法是利用某种调制方法对长脉冲激光进行调制的方法,本文中根据参考文献[16]来选取热膨胀效应下的光声转换仿真参数,具体参数如表 1 所示。使用 Nd:glass 激光器,长脉冲激光波形近似为方形脉冲,在边缘逐渐下降,该波形可在极端聚焦情况下减少非线性效应波形突变的影响。

表 1 长脉冲法仿真参数<sup>[16]</sup>

Table 1 Simulation parameters of long-pulse-duration laser method<sup>[16]</sup>

parameter	value
laser wavelength	1053 nm
pulse width	2 ms
peak power	25 kW
coefficient of thermal expansion	$2 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
laser beam radius	6 mm
specific heat capacity of liquids	$4.17 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
speed of sound in liquids	1500 m/s
optical absorption coefficient	$15.7 \text{ m}^{-1}$
optimal center frequency	10 kHz

由于水声信道存在多径效应,需选取合适的符号间隔以减轻符号间干扰,故本文中选取  $n$ -FSK 调制,该调制系统由多台激光器构成激光阵列,通过控制激光器发射频率减少由多径引起的符号间干扰。以 2-FSK 为例,将其中一个调制频率记为 1,另一个调制频率记为 0,两个调制频率中心频率都为最佳中心频率。每台激光器,符号持续时间为 2 ms,符号间隔为 98 ms,通过机械斩波器控制激光频率变化,例如,传输速率为 100 bits/s 时,需由 10 台激光器组成阵列,以激光器发射频率并行发射。该方案可通过增加调制频率数量,以减少激光器数量并提升传输速率,但所需带宽随传输速率呈非线性增加。理论上可采用增加符号持续时间,减少所占带宽,为此需减少激光器发射功率,以增加脉冲持续时间,这会导致声波在水中的声压级(sound pressure level, SPL)和传输距离减少。此外,随着调制频率数量增加,会降低对多径效应的抑制,可通过信道编码减少多径效应,但会降低传输速率。

为此,本文作者提出了另一种调制方式,即  $n$ -MFSK 调制,在一个符号间隔期间发射多个频率,以增加调制频率数量。以 2-MFSK 为例,将两台相同激光器基频设为  $f_1$  和  $f_2$ ,其中,当两台激光器均不发射激光时,记为 00;当激光器 1 发射频率为  $f_1$ 、激光器 2 不发射时,记为 01;当激光器 1 不发射、激光器 2 发射频率

为  $f_2$  时,记为 10;当激光器 1 发射频率为  $f_1$ 、激光器 2 发射频率为  $f_2$  时,记为 11。当传输速率达到 100 bits/s 时,需要 5 台激光器组成阵列。2-FSK 和 2-MFSK 调制的时域和频域结果分别如图 2a 和图 2b 所示。

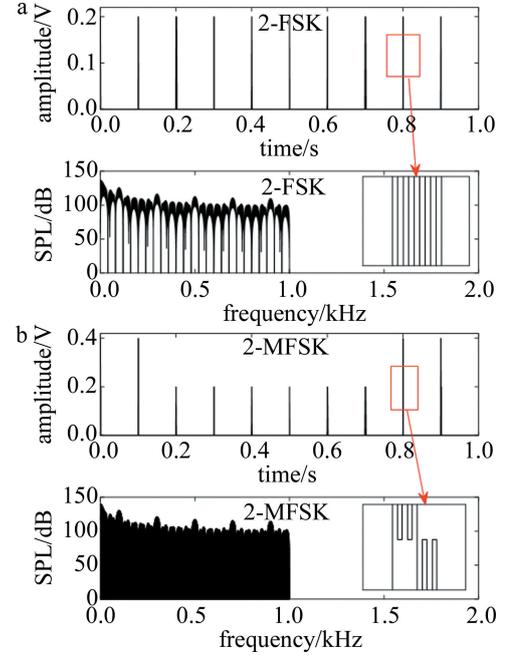


图 2 长脉冲法时域和频域仿真结果

Fig. 2 Long-pulse-duration laser time domain and frequency domain simulation results

该方案的优点为通过激光器频率组合,增加每个符号传输比特数来提高传输速率,并且在使用开关键控时,可提高带宽利用率。

根据表 1 中的参数,计算不同调制方法下长脉冲法水下通信距离为<sup>[17]</sup>:

$$\begin{cases} X_s - X_l - X_n = R_{\text{SNR}} \\ X_l = 20 \lg r + \alpha r \times 10^{-3} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $X_s$  为声源级; $X_l$  为声传播损失; $X_n$  为背景噪声; $R_{\text{SNR}}$  为接收器检测信噪比; $\alpha$  为海水吸收系数。

表 2 为长脉冲法  $n$ -FSK 和  $n$ -MFSK 调制方法通信速率、带宽、声压级和水中传输距离的比较。其中背景噪声取 3 级海况, $R_{\text{SNR}} = 10 \text{ dB}$ , $\alpha = 0.02 \text{ dB/km}$ ,声压级作用范围以 137 dB 为基准(依据表 1 计算)。随着调制频率数量增加, $n$ -MFSK 调制可提高通信速率,并改善频带利用率,但声压级和水中传输距离会随符号持续时间内调制频率数量增加而减小。比较 4-FSK 和 2-MFSK 调制,两者可达到相同的通信速率,且 2-MFSK 只需要 1 kHz 的带宽,然而在最坏情况下,当一个符号持续时间传输两个频率时,激光能量必须除以 2,因此声压级减小到 131 dB。这导致水中传输距离从 4-FSK

的 708 m 减小到 355 m, 随着一个符号时间内传输频率数量增加, 水中传输距离将大幅度减少。因此, 当采用  $n$ -MFSK 调制时, 需权衡通信速率与水中传输距离的关系, 根据实际需求选择合适的调制方式。

表 2 长脉冲法  $n$ -FSK 和  $n$ -MFSK 调制的比较Table 2 Comparison of  $n$ -FSK and  $n$ -MFSK modulation by long-pulse-duration laser method

modulation method	data rate/ (bit · s <sup>-1</sup> )	bandwidth/ kHz	SPL/ dB	in-water range/m
2-FSK	10	1	137	708
4-FSK	20	2	137	708
8-FSK	30	4	137	708
16-FSK	40	8	137	708
2-MFSK	20	1	131	355
3-MFSK	30	1.5	128	251
4-MFSK	40	2	125	178

## 2.2 采用重复频率法的 $n$ -MFSK 调制

重复频率法是基于激光致声的热膨胀效应通过控制激光器的重复频率产生调制声信号的方法。由于单激光脉冲产生的声信号频谱所占带宽大, 频带利用率低, 其信号能量会在水下发射严重衰减, 易产生畸变, 不利于传输编码。因此, 需采用产生窄带且中心频率可控的声信号, 即高重复率的激光脉冲信号。

当激光垂直射向水面时, 激光脉冲重复率为  $f_r = 1/T$ ,  $T$  为激光脉冲周期时, 激光脉冲的频谱可表示为<sup>[20]</sup>:

$$\begin{cases} I(\omega) = I_0(\omega)G(\omega) \\ G(\omega) = \frac{\sin(N\omega T/2)}{\sin(\omega T/2)} \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $I_0(\omega)$  为单脉冲的频谱;  $G(\omega)$  频谱由于谐波关系呈现梳状结构;  $N$  为阶数;  $f_r$  为相邻谱峰的间距, 且其周期可控。将式(8)代入式(4)可得<sup>[21]</sup>:

$$s(r, \omega) = -\frac{AI_0\beta a^2}{2c_p} E(\omega) I_0(\omega) G(\omega) \quad (9)$$

式中:  $E(\omega)$  与  $\mu$ 、 $a$ 、 $\theta$  等参数有关, 其中激光器参数  $\mu$  和  $a$  是固定的, 故只需控制  $f_r$  使  $s(r, \omega)$  窄带特性最好即可。选择激光器发射重复率  $f_r$  时, 要使声信号高次谐波被抑制且中心频率处的能量强, 因此, 激光器的重复频率需满足<sup>[20]</sup>:

$$\begin{cases} 20\lg \left| \frac{s(f_r)}{s(f_{\max})} \right| \leq 3 \text{ dB} \\ 20\lg \frac{|s(f_r)|}{\max |s(nf_r)|} \geq 3 \text{ dB}, (n = 1, 2, \dots) \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $s(f_r)$  为中心频率的幅度;  $s(f_{\max})$  为频谱幅度的最

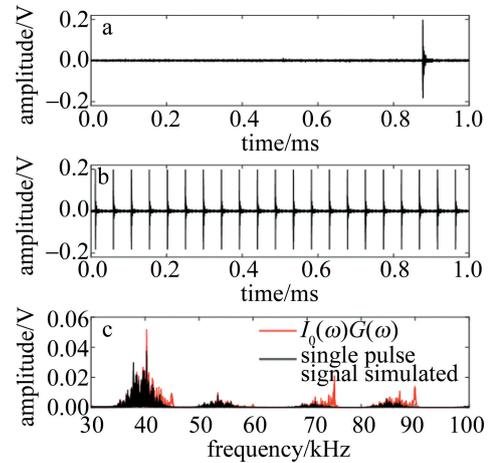
大值;  $\max |s(nf_r)|$  为高次谐波频谱幅度的最大值, 由此, 可确定激光器发射重复率的范围。根据表 3 中的参数, 采用调  $Q$  Nd:YAG 高重频激光器, 并采用灵敏度为  $-170$  dB 的光纤水听器对声波进行接收, 联合式(8)~式(10)计算  $f_r$  的范围可得:

$$12 \text{ kHz} \leq f_r \leq 31 \text{ kHz} \quad (11)$$

表 3 重复频率法仿真参数<sup>[20]</sup>Table 3 Simulation parameters of high repetitive rate method<sup>[20]</sup>

parameter	value
laser wavelength	1060 nm
pulse width	8 ns
single pulse energy	100 mJ~800 mJ
optical absorption coefficient	13.7 m <sup>-1</sup>
angle of observation from the vertical	1.31 rad

目前现有的激光器难以从实验的角度进行高速通信研究, 由于相邻激光脉冲产生的声信号具有很好的重复性, 故可采用单个或多个实验信号进行重频组合, 获得所需的高重复率激光。图 3a 中将单脉冲激光致声信号以  $f_r = 21$  kHz 重频组合, 图 3b 是依据式(9)计算后得到结果和单脉冲重频组合信号频谱进行对比。两者频谱特征基本吻合, 验证了该方案的可行性。

图 3 a—单脉冲激光信号时域波形 b—重频组合信号时域波形 c— $I_0(\omega)G(\omega)$  与单脉冲重频组合频域波形Fig. 3 a—single pulse laser signal time domain waveform b—re-frequency combination signal time domain waveform c—spectrogram with single laser signal re-frequency combination and  $I_0(\omega)G(\omega)$ 

通过控制激光器的重复频率使其有规律地变化, 从而完成  $n$ -FSK 和  $n$ -MFSK 调制以搭载信息,  $n$ -FSK 调制中一个码元信号以重复频率  $f_r$  的  $N$  个激光脉冲激发声信号表示, 在符号间隔  $(0, T_0)$  中, 码元信号可表示为:

$$s_i(t) = \text{Re}[\text{IFFT}(s(f_{r,i}))], (i = 1, 2, \dots, n) \quad (12)$$

故  $n$ -FSK 调制信号可表示为:

$$s(t) = \sum_{m=0}^{\infty} s_i(t) g_{\tau}(t - mT_0),$$

$$(i = 1, 2, \dots, n) \quad (13)$$

式中:  $\text{IFFT}(s(f_{r,i}))$  表示对  $s(f_{r,i})$  进行的傅里叶逆变换 (inverse fast Fourier transform, IFFT);  $g_{\tau}(t - mT_0)$  是脉宽为  $\tau$ 、周期为  $T_0$  的门函数。

$n$ -MFSK 调制中每个码元含有零个、一个或多个调制频率, 单个码元信号可表示为:

$$s_{\text{MFSK},i}(t) = \sum_{i=1}^n \cos\left(\frac{n_i \pi}{2}\right) s_i(t - (i-1)\tau),$$

$$(i = 1, 2, \dots, n) \quad (14)$$

式中:  $n_i$  取值为 0 或 1, 取 0 代表该码元含有调制频率  $f_{r,i}$ , 取 1 代表不含调制频率  $f_{r,i}$ 。

$n$ -MFSK 调制信号可表示为:

$$s_{\text{MFSK}}(t) = \sum_{m=0}^{\infty} s_{\text{MFSK},i}(t) g_{\tau}(t - mT_0),$$

$$(i = 1, 2, \dots, n) \quad (15)$$

通过 FSK 和 MFSK 调制信号搭载信息, 实现激光信号的编码传输。图 4a 和图 4b 分别对应 4-FSK 和 2-MFSK 调制时域和频域波形, 符号间隔为 50 ms。

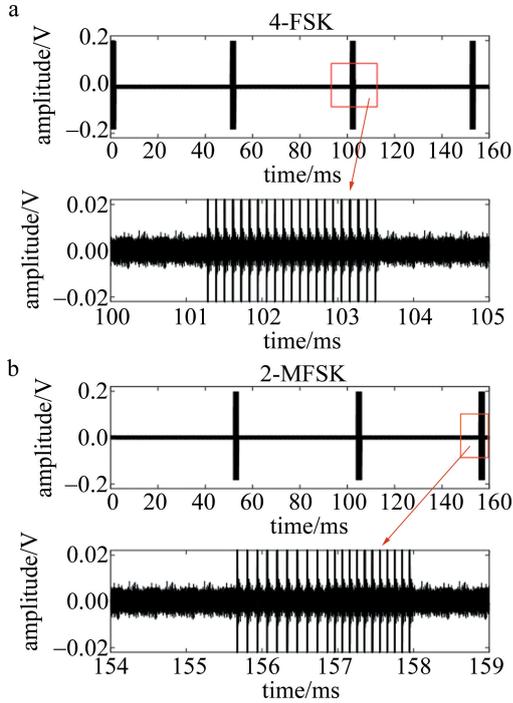


图 4 重复频率法时域波形

Fig. 4 High repetitive rate method time domain waveforms

4-FSK 调制频率  $f_{r,i}$  根据式 (12) 重复频率范围等间隔取值, 分别取为 13 kHz、17 kHz、21 kHz 和 25 kHz, 代表 4 个码元, 每个码元用二进制依次表示为 {00, 01, 10, 11}, 码元带宽约为 500 Hz。2-MFSK 调制

频率  $f_{r,i}$  分别取为 17 kHz 和 25 kHz, 第 1 个码元不包含频率信息为  $f_{r,0}$ , 第 2 个码元含有 1 个 17 kHz 频率信息为  $f_{r,1}$ , 第 3 个码元含有 1 个 25 kHz 频率信息为  $f_{r,2}$ , 第 4 个码元含有两个 17 kHz 和 25 kHz 频率信息为  $f_{r,1,2}$ , 每个码元用二进制依次表示为 {00, 01, 10, 11}。如图 3 所示, 2-MFSK 调制可减少基频数量, 同时提高通信速率并提高带宽利用率。

表 4 为重复频率法  $n$ -FSK 和  $n$ -MFSK 调制的比较。参数计算方式与长脉冲法相同, 声压级作用范围以 139 dB 为基准 (依据表 2 计算)。对比  $n$ -FSK 和  $n$ -MFSK 调制, 在相同调制频率数量时,  $n$ -MFSK 调制可提高通信速率, 并提高频带利用率, 与此同时代价是水中通信距离的损失。

表 4 重复频率法  $n$ -FSK 和  $n$ -MFSK 调制的比较

Table 4 Comparison of high repetitive rate method  $n$ -FSK and  $n$ -MFSK modulation

modulation method	data rate/ (bit · s <sup>-1</sup> )	bandwidth/ kHz	SPL/ dB	in-water range/m
2-FSK	20	1	139	897
4-FSK	40	2	139	897
8-FSK	60	4	139	897
16-FSK	80	8	139	897
2-MFSK	40	1	133	459
3-MFSK	60	1.5	130	316
4-MFSK	80	2	127	224

### 3 结论

对提升激光致声空-水跨介质通信速率的方法开展了仿真研究工作, 得到以下研究结果。

(a)  $n$ -FSK 调制可有效减少符号间的多径干扰, 长脉冲法采用激光器阵列的方式实现, 而重复频率法采用激光器频率切换的方式实现, 两种方法都可通过增加调制频率数量提高通信速率, 并保持声压级和 underwater 通信范围不变, 但所需带宽会随传输速率呈非线性增加。

(b)  $n$ -MFSK 调制可在  $n$ -FSK 调制的基础上进一步提高通信速率, 长脉冲法主要通过激光阵列的方式, 并采用频率叠加的方式实现, 重复频率法通过控制激光器频率变化时域上分配时间段的方式实现。随着调制频率数量增加,  $n$ -MFSK 调制可提高通信速率, 并改善频带利用率, 但声压级和水中传输距离会随符号持续时间内调制频率数量的增加而减小。

(c)  $n$ -FSK 调制可保证通信速率提升, 不会对水中传输距离造成损失。相比  $n$ -FSK,  $n$ -MFSK 调制可提高

通信速率并改善频带利用率,但水中传输距离会受调制频率数量影响。实际使用时,需在通信速率与水中传输距离之间进行权衡,以实际需求作为调制方式选择基准。

本文作者提出了一种  $n$ -MFSK 调制方式,进一步提升激光致声空-水跨介质通信速率,分别采用长脉冲法和重复频率法的调制方式,结合现有激光器的技术指标分析了通信性能,计算了通信速率的提升效果,研究结果对激光致声在空-水跨介质通信领域中的实际应用有一定价值。提供的可选择方案有助于未来实现空中平台与水下目标之间的通信,长脉冲激光阵列的方式需搭载于机载平台,且占据较大空间,而重复频率激光频率切换的方式,目前受激光器的重复频率等性能指标的限制,随着激光器工艺的提升可作为未来空-水跨介质通信的方案之一。

下一步研究将针对实际海试环境因素影响,特别是环境噪声对于通信误比特率的影响,开展环境噪声对于通信质量影响的评价工作,包括海洋背景噪声、潜行器本身的螺旋桨运行的机械噪声等。

#### 参 考 文 献

- [1] SPEARS A, HOWARD A M, WEST M, *et al.* Determining underwater vehicle movement from sonar data in relatively featureless seafloor tracking missions [C]//IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision. New York, USA; IEEE, 2014: 909-916.
- [2] FANG E Zh, LI Z R, GUI Ch Y. Crossing the sea and holding the sky to enhance the submarine communication security capability with the current situation and outlook of cross-media communication technology[J]. Defence Science & Technology Industry, 2022, 262(2): 59-62 (in Chinese).  
方尔正,李宗儒,桂晨阳. 穿海牵天提升对潜通信保障能力——跨介质通信技术现状及展望[J]. 国防科技工业, 2022, 262(2): 59-62.
- [3] NASH P, STRUDLEY A, CRICKMORE R, *et al.* High efficiency TDM/WDM architectures for seismic reservoir monitoring[J]. Proceedings of the SPIE, 2009, 7503: 1125-1128.
- [4] WESTERVELT P J, LARSON R S. Laser-excited broadside array [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1973, 54(1): 121-122.
- [5] BUNKIN F V, KARLOV N V, KOMISSAROV V M, *et al.* Excitation of sound when a surface layer of a liquid absorbs a laser pulse[J]. Soviet Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters, 1971, 13(9): 341-343.
- [6] ZHANG Y D, ZHAO Zh Y, YAO Ch B, *et al.* The nonlinear absorption and optical limiting in phenoxy-phthalocyanines liquid in nano- and femto-second regime; Experimental studies[J]. Optics & Laser Technology, 2014, 58(11): 207-214.
- [7] CARVER C J, TIAN Z, ZHANG H, *et al.* Amphilight: Direct air-water communication with laser light[J]. GetMobile: Mobile Computing & Communications review, 2021, 24(3): 26-29.
- [8] LEI L, JU Z, LEI Z, *et al.* Research on laser induced acoustic source based underwater communication system [J]. Proceedings of the SPIE, 2016, 10157: 477-483.
- [9] PARTON S, DALGLEISH F, BEAUJEAN P P, *et al.* Acquisition and registration of bathymetric acoustic data and MOFSLI (multiple overlapping field of view serial laser imager)[C]// 2013 MTS/IEEE OCEANS-Bergen. New York, USA: IEEE, 2013: 1-8.
- [10] JIANG H, QIU H, HE N, *et al.* Research on the optoacoustic communication system for speech transmission by variable laser-pulse repetition rates[J]. Results in Physics, 2018, 9(4): 1291-1296.
- [11] REN Y H, LIN J P, TONG Y, *et al.* Analysis of driving circuit characteristics of high-power pulsed xenon lamp[J]. Laser Technology, 2022, 46(3): 397-401 (in Chinese)  
任亚辉,林菊平,童勇,等. 高能脉冲氙灯驱动电路特性分析[J]. 激光技术, 2022, 46(3): 397-401.
- [12] CHEN Q M. Characteristics of photoacoustics induced by pulse laser in liquid[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2006, 4(3): 28-31 (in Chinese).  
陈清明. 脉冲激光在液体中激发的声波特性研究[J]. 光学与光电技术, 2006, 4(3): 28-31.
- [13] WANG X Y, WANG J A, ZONG S G, *et al.* Laser acoustic energy conversion efficiency in optical breakdown mechanism [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(3): 579-583 (in Chinese).  
王晓宇,王江安,宗思光,等. 光击穿机制下的光声能量转换效率[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(3): 579-583.
- [14] WHITE R M. Elastic wave generation by electron bombardment or electromagnetic wave absorption [J]. Journal of Applied Physics, 1963, 34(7): 2123-2124.
- [15] WHITE R M. Generation of elastic waves by transient surface heating[J]. Journal of Applied Physics, 1963, 34(12): 3559-3567.
- [16] BLACKMON F, ESTES L, FAIN G. Linear optoacoustic underwater communication[J]. Applied Optics, 2005, 44(18): 3833-3845.
- [17] BLACKMON F A, ANTONELLI L. Experimental detection and reception performance for uplink underwater acoustic communication using a remote, in-air, acousto-optic sensor[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2006, 31(1): 179-187.
- [18] BLACKMON F, ANTONELLI L. Remote, aerial, trans-layer, linear and nonlinear downlink underwater acoustic communication[C]// OCEANS 2006. New York, USA; IEEE, 2006: 1-7.
- [19] ANTONELLI L, BLACKMON F. Laser-based method for docking unmanned underwater vehicle to a submarine: US, 8047149B1 [P]. 2011-11-01.
- [20] PENG Sh, ZHANG M M, WANG J A. Method of laser-generated sound with high repetition rate for underwater acoustic communication[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(7): 0705005 (in Chinese).  
彭水,张明敏,王江安. 一种采用高重复频率激光进行水声通信的方法[J]. 中国激光, 2012, 39(7): 0705005.
- [21] LI P, ZHAO Y, ZHOU Zh Q, *et al.* Research on laser induced acoustic detection of trans-media aerial-underwater[J]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 50(5): 20200310 (in Chinese).  
李鹏,赵扬,周志权,等. 一种跨介质的空中-水下激光致声探测技术研究[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(5): 20200310.