

文章编号:1007-2780(2022)11-1453-06

基于哈达玛基编码算法的水下光传输优化

张 峰¹, 李博骁^{1,2}, 田 蕾³, 聂杰文³, 杨海宁^{3*}

(1. 中国电力科学研究院, 北京 100041;

2. 清华大学 电子工程系, 北京 100084;

3. 东南大学 电子科学与工程学院, 江苏 南京 210096)

摘要:水下无线光传输以蓝绿激光为载体,传输速度快,实时性强,在海洋勘探、海洋通信等方面起着非常重要的作用。然而光束自身的发散及其受水吸收和散射作用影响,导致传输过程中能量损失,接收端信号微弱。为了提高光束在水中的传输效率,本文提出了一种基于哈达玛基编码算法的光束整形模块,通过空间光调制器对波前相位进行调制,将光束分为参考光束和调制光束,并通过四步相移计算两种光的相位角,在多次变换中寻找最优全息图,聚焦接收端处的光束,减小光能经过水下信道后的损失。该研究成果有效地提升了不同距离下接收端的能量,实验结果显示,调制越精细,光束聚焦效果越好,达到了 15 m 处接收端中心能量 2.3 倍的提升。

关键词:光束整形;哈达玛基编码算法;空间光调制器

中图分类号:TP391 文献标识码:A doi:10.37188/CJLCD.2022-0144

Optimization of underwater optical transmission based on Hadamard encoding algorithm

ZHANG Feng¹, LI Bo-xiao^{1,2}, TIAN Lei³, NIE Jie-wen³, YANG Hai-ning^{3*}

(1. China Academy of Electronics and Information Technology, Beijing 100041, China;

2. Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

3. School of Electronic Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: Underwater wireless optical transmission adopts blue-green laser with the advantage of fast and real-time, playing an important role in ocean exploration and communication. However, the divergence of the beam itself is affected by the absorption and scattering of water, resulting in energy loss and weak signal at the receiving end. As a result, a beam shaping module based on Hadamard encoding algorithm is proposed in this paper to improve the transmission efficiency of beam in water. The wavefront phase of incident beam is modulated by liquid crystal on silicon to find the optimal hologram in multiple iterative process and reduce the loss of light energy after passing through the underwater channel. The beam is divided into reference beam and modulation beam and the angle of the two beams can be calculated by four-step

收稿日期:2022-04-24;修订日期:2022-05-06.

基金项目:国家自然科学基金(No. 62105059);江苏省自然科学基金(No. BK20200351)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 62105059); Natural Science Foundation of Jiangsu Province of China (No. BK20200351)

*通信联系人, E-mail: h. yang@seu.edu.cn

phase shift. The results show that the energy of the receiver at different distances can be improved, reaching a 2.3 times increase in the energy of the receiver at 15 m. The finer the beam is modulated, the better it focuses.

Key words: beam shaping; hadamard encoding algorithm; liquid crystal on silicon

1 引言

海洋面积约占地球表面积的 2/3,蕴藏着丰富的资源,具有广阔的发展和利用空间^[1]。随着陆地资源的日益枯竭和人类未来发展需要,海洋勘探成为了各个国家的当务之急,海洋和水下相关理论知识的研究也越来越深入,这对水下激光技术提出了更高的要求^[2]。激光频率高、方向性好且传送信息不受干扰^[3-4],在水下武器的引信装置、海洋监测、水下无人机等方面发挥了重要作用^[5-7]。然而光束在水中的传输特性对水下光传输性能起着决定性的影响^[8]。一方面,光束自身对衍射和发散没有任何抑制能力;另一方面,海水对光束具有吸收和散射作用,水中杂质和气泡都会使波阵面发生畸变^[9-10],光斑逐渐增大,能量逐渐分散,光信号衰减严重,导致接收端探测到的信号很微弱,对水下成像、通信等都会造成很大的影响。因此,通过减小光束自身的发散,补偿光束在水中的相位损失,降低光束在传输过程中的损耗,对改善光束在水下传输的质量有着重要的应用价值。

本文提出了一种基于哈达玛基编码算法(Hadamard encoding algorithm, HEA)的光束整形技术,通过计算得到接收端光斑中心能量增强的全息图,在水下 15 m 的距离下将接收端光强提高了约 2.3 倍。

2 系统原理

水下无线光传输系统由发射端、信道和接收端组成,但水中信道复杂,光束受水中吸收和散射作用,通常接收端处检测到的光信号很微弱。光束在水中的吸收和散射作用可以用一个传输矩阵来描述,经过传输后的出射光 E_{out} 可以表示为:

$$E_{\text{out}} = \sum_{n=1}^N t_{mn} E_{\text{in}} = \sum_{n=1}^N t_{mn} A_n \exp(i\varphi_n), \quad (1)$$

其中: E_{in} 表示入射光, A_n 和 φ_n 分别表示入射光中

每一个元素的振幅和相位, t_{mn} 表示光束在水中的传递函数。通过建立基于反馈的波前整形,优化加载在入射光上的相位图,可以使入射光束的每一个元素经过水箱后在目标位置处光强最大,如图 1 所示。



图 1 光束整形原理图

Fig. 1 Block diagram of beam shaping system

引入 η 参数描述目标处光斑的强度增益,如式(2)所示:

$$\eta = \frac{I_{\text{target}}}{I_{\text{initial}}}, \quad (2)$$

I_{target} 是目标区域经过调制后的光斑强度, I_{initial} 是目标区域初始时刻的光斑强度。 η 值越大,目标区域光斑强度增强越高,这一评价函数用来表征全息图的效果。

本实验中,采用 HEA 算法^[11-12]确定最优相位图。与连续序列算法相比,HEA 使用一系列的哈达玛基向量和四步相移机制,在每次迭代中可以调制 1/2 的相位图元素,具有高效的相位调制能力和鲁棒性。这些哈达玛基通过对单位矩阵进行快速沃尔什-阿达玛逆变换生成,相互正交,任意两个基向量线性无关,用 $H_n(k)$, $k=1, 2, \dots, n^2$ 表示,其中 n 为哈达玛矩阵的阶数, k 为列的序号。哈达玛矩阵中除第一列外,每个哈达玛基向量的 1/2 元素值为 1,其余 1/2 元素为 -1。图 2 所示为哈达玛矩阵的示例图。

首先,初始化列数为 256 的哈达玛矩阵,由于需要加载的相位图为二维, $H_n(k)$ 被重塑为一列二维矩阵 (16×16),如图 3 所示。然后,采用四步相移计算 +1 和 -1 部分的延迟角,采用 $(H_n(k) + 1)/2$ 将 -1 和 1 的值转换为 0 和 1,没有相位调制的“0”部分设置为参考光,在“1”部分附加 $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ 的相位调制,参考光和调制光发生干涉,利

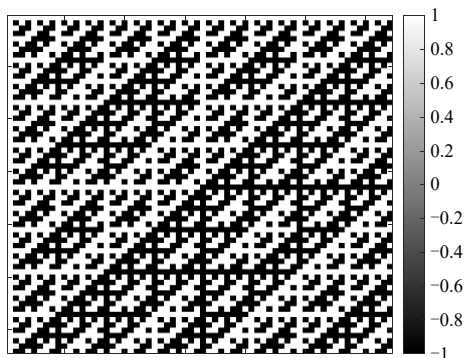


图 2 哈达玛矩阵示例图

Fig. 2 Example diagram of the Hadamard matrix

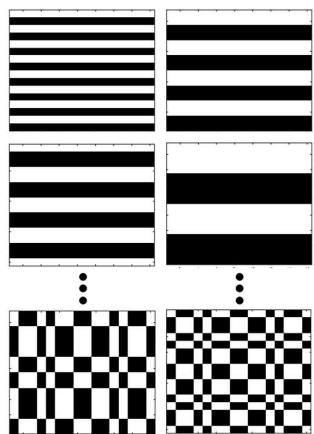


图 3 哈达玛基向量转化为二维矩阵图

Fig. 3 Diagram of a two-dimensional matrix transformed from the Hadamard matrix

用四步相移的方法可以在目标位置处获得两种光的相位差。因此,在每一阶上加载 4 次相位图,如式(3)所示:

$$\varphi_{n,m}(k) = \varphi_{n-1}(k) + \frac{\left(\frac{m\pi}{2}\right)(H_n(k) + 1)}{2},$$

$$m = 0, 1, 2, 3, \quad (3)$$

其中: $\varphi_{n-1}(k)$ 是 $n-1$ 阶上最优的相位图, $\left(\frac{m\pi}{2}\right)$

是 4 次相移操作,参考光和调制光的相位角可以计算为

$$\varphi = \text{Arg}[(I_1 - I_3) + i(I_2 - I_4)], \quad (4)$$

其中, I_i 表示第 i 步相移的强度, $\text{Arg}()$ 表示计算相位角。最新的全息图可表示为:

$$\psi_n(k) = \psi_{n-1}(k) + \varphi(H_n(k) + 1)/2. \quad (5)$$

图 4 为 HEA 的优化过程流程图。

图 5 所示为全息图变化过程,以 16×16 哈达

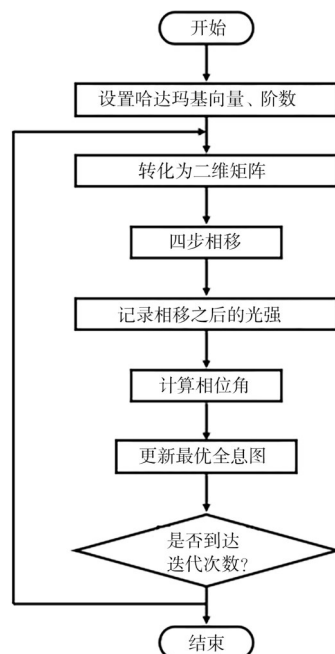


图 4 优化过程流程图

Fig. 4 Flow chart of optimization process

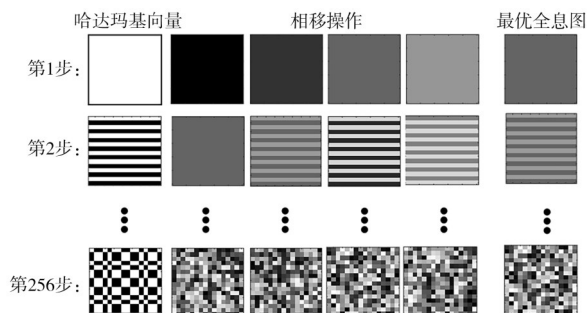


图 5 相移操作图及优化过程

Fig. 5 Phase shift operation diagram and optimization process

玛矩阵为例说明 HEA 原理,每一行选取了哈达玛基向量,每个基向量下都采取 4 次相移操作,得到相移角,基于上一阶的最优全息图更新下一次的全息图。

3 实验设置与结果

本实验构建了如图 6 所示的水下光束传输系统。一束波长为 450 nm、功率为 2 mW 的激光出射后,束腰半径为 2 μm ,经过准直透镜改善光束质量,减缓光束在水中的发散,然后通过分光镜射入反射型空间光调制器,此时光束的半径为 352 μm 。空间光调制器是一种可以精准调节波前相位分

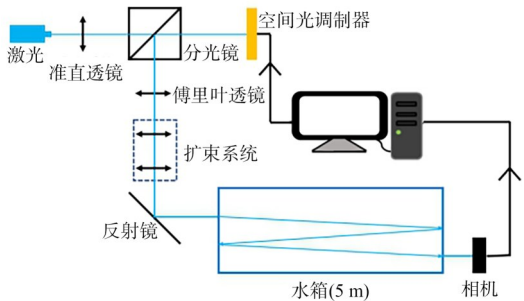


图6 实验系统框图

Fig. 6 Diagram of the system scheme

布的器件,由一系列微小的单元排列组成,基于液晶指向矢在电场作用下发生偏转、光程差发生变化的原理对波前进行调制。调制后的光束经过透镜组进行扩束,使光束传输更远的距离。8 bit 灰度值的相机放置于接收端,用于探测光束在经过水箱之后的光斑形貌。以中心光束强度作为反馈信号,根据 HEA 算法的流程更新全息图,直至得到最优解。

图 7 展示了水下传输至 15 m 处时接收端中心光强的迭代曲线。使用的哈达玛矩阵在空间光调制器上呈现为 16×16 个单元,每个单元包含 20×20 个像素。由于实验中使用的为 8 bit 相机,光强取值范围在 $0 \sim 255$ 之间,取值越大,光强越大。图 7 显示,经过 256 次迭代之后,光强从 22 提升至 51,提升了 2.3 倍。

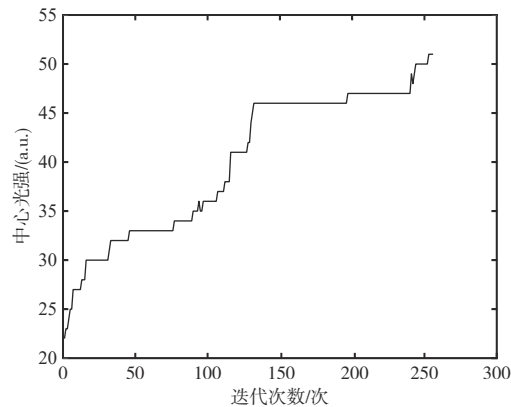


图7 中心光强在 15 m 处的迭代曲线

Fig. 7 Central intensity of the beam at 15 m with iterations

图 8 展示了更换全息图的时序图。首先在 t_0 时刻计算机输出需要加载的全息图,经由 HDMI 接口传递到空间光调制器。在这个过程中存在数据传输链路延迟 t_1 。然后空间光调制器输出全

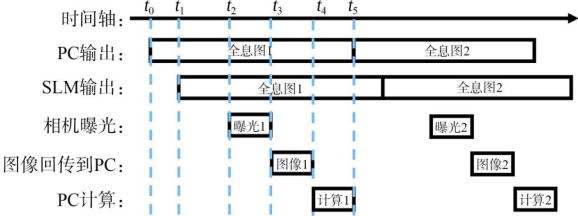


图8 全息图迭代过程中的时序流程图

Fig. 8 Sequence diagram of hologram iteration

息图对入射光束进行调制,相机连续对输出光场信息进行曝光记录并将图像数据回传到计算机。由于受到全息图的输出延时、空间光调制器响应时间的延时、CCD 相机曝光和回传图像的延时影响,尽管空间光调制器的调制速度理论上可以达到 60 Hz,相机帧频为 55 fps,但完成一次全息图的更换需 150 ms 左右,只能达到 6 帧/s 的迭代速度,限制了光聚焦速度的提高。总迭代次数与哈达玛矩阵使用大小有关,哈达玛矩阵阶数越高,迭代次数越多。图 7 记录的优化过程耗时约 3 min。

图 9 比较了在不同距离下得到的最优全息图和光束整形前后的光斑形貌。每一段距离都采集了 3 种光斑形貌:第一种为未加调制时接收端的光斑形貌;第二种采用 8×8 的哈达玛矩阵,在空间光调制器上呈现为 8×8 个单元,每个单元包含 40×40 个像素;第三种采用 16×16 的哈达玛矩阵,在空间光调制器上呈现为 16×16 个单元,每个单元包含 20×20 个像素。相机的增益和曝光设置在每一个固定距离下保持一致。结果显示,使用 HEA 算法均可以使接收端光斑中心的强度得到提升,哈达玛矩阵阶数越高,单元分块越精细,光束聚焦效果越好。

图 10 直观展示了不同调制量下中心光强提升倍数随传输距离的变化。调制量越精细,中心光强提升越多,这与图 9 中的光斑相符。

上述实验针对水下传输至 15 m 处进行优化,展示了光束经过水下信道后的中心光强提升效果。实验中激光源输出功率为 2 mW,经过水体吸收散射后光束的能量微弱且分散,传输距离受限于探测器感应区域和分辨率。另外,光束束腰半径约占 55 个像素,对光束相位分布进行调制时,每个单元包含 40×40 个像素及 20×20 个像素,光束能量分布在最密集的地方精细度不够,光斑中心强度增强效果有限。因此,要使光束整

		全息图	光斑形貌
0 m	没有调制		
	HEA算法整形调制(8×8)		
	HEA算法整形调制(16×16)		
5 m	没有调制		
	HEA算法整形调制(8×8)		
	HEA算法整形调制(16×16)		
10 m	没有调制		
	HEA算法整形调制(8×8)		
	HEA算法整形调制(16×16)		
15 m	没有调制		
	HEA算法整形调制(8×8)		
	HEA算法整形调制(16×16)		

图9 不同传输距离下的全息图和光斑

Fig.9 Holograms and beam spots at different transmission distances

形技术应用于更远的传输距离,一方面要通过提高激光源的输出功率、探测器的灵敏度来提高系统的性能,另一方面要将每个单元划分的像素个数减小,使用更高阶的哈达玛矩阵,光束聚焦效果将更加显著,但迭代次数增加,耗时将会增大。

参 考 文 献:

- [1] RAYNER R, JOLLY C, GOULDMAN C. Ocean observing and the blue economy [J]. *Frontiers in Marine Science*, 2019, 6: 330.
- [2] 张耀光,魏东岚,王国力,等. 中国海洋经济省际空间差异与海洋经济强省建设[J]. *地理研究*, 2005, 24(1): 46-56. ZHANG Y G, WEI D L, WANG G L, *et al.* Analysis of interprovincial space difference in marine economy and the building of marine economically strong provinces in China [J]. *Geographical Research*, 2005, 24(1): 46-56. (in Chinese)
- [3] HAN B, ZHAO W, XIE X P, *et al.* Influence of laser linewidth and polarization modulator length on polarization

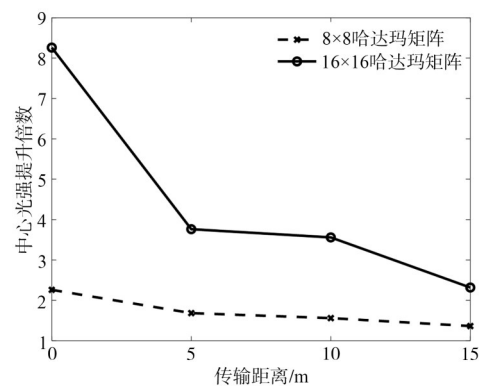


图10 不同调制量下中心光强随传输距离的变化

Fig.10 Central intensity of the beam with transmission distance under different modulation quantities

相机回传数据及计算机处理数据的延时可以通过错位对准迭代时序^[13]进行压缩,提高全息图的优化速度。光束整形受限于空间光调制器的精度,这一技术应用于水下光传输的极限传输距离需要更多的实验论证。

4 结 论

本文通过改变入射光的相位分布,减缓了光束在水中的发散和吸收,从而提升了接收端的光强,提高了系统的传输效率,证明了HEA算法在水下光传输中控制目标光强方面的卓越性能。在本文的验证性实验中,通过结合哈达玛矩阵和四步相移机制,得到适合特定距离下光束传输的最优全息图,在水下15 m处光束中心强度提高2.3倍。HEA算法仍有较大的提升空间,例如可以使用三步相移干涉法计算参考光和调制光的相位角提升聚焦速度,HEA算法可以与遗传算法等全局优化算法结合^[14],在中心光强提升的基础上使光强分布更加均匀。这项工作也为水下光传输获取更高的性能开辟了新的可能性。

- shift keying for free space optical communication [J]. *Optics Express*, 2015, 23(7): 8639-8649.
- [4] COCHENOUR B, MULLEN L, MUTH J. Temporal response of the underwater optical channel for high-bandwidth wireless laser communications [J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2013, 38(4): 730-742.
- [5] YUH J. Design and control of autonomous underwater robots: a survey [J]. *Autonomous Robots*, 2000, 8(1): 7-24.
- [6] AKIZONO J, IWASAKI M, NEMOTO T, *et al.* Development on walking robot for underwater inspection [C]// *Proceedings of the 4th International Conference on Advanced Robotics*. Columbus, Ohio: Springer, 1989.
- [7] WYNN R B, HUVENNE V A I, LE BAS T P, *et al.* Autonomous underwater vehicles (AUVs): their past, present and future contributions to the advancement of marine geoscience [J]. *Marine Geology*, 2014, 352: 451-468.
- [8] 王广聪,董淑福,温东,等. 海水中蓝绿激光传输特性研究[J]. 电子技术, 2010, 47(3): 68-70.
WANG G C, DONG S F, WEN D, *et al.* Research on blue-green laser transmission in seawater [J]. *Electronic Technology*, 2010, 47(3): 68-70. (in Chinese)
- [9] ZHAI C, TAN L Y, YU S Y, *et al.* Fiber coupling efficiency for a Gaussian-beam wave propagating through non-Kolmogorov turbulence [J]. *Optics Express*, 2015, 23(12): 15242-15255.
- [10] 张利,孙传东,何俊华. 基于成像自适应光学的水下成像系统研究[J]. 应用光学, 2010, 31(5): 690-694.
ZHANG L, SUN C D, HE J H. Underwater imaging system based on adaptive optics [J]. *Journal of Applied Optics*, 2010, 31(5): 690-694. (in Chinese)
- [11] WU Z H, LUO J W, FENG Y H, *et al.* Controlling 1 550-nm light through a multimode fiber using a Hadamard encoding algorithm [J]. *Optics Express*, 2019, 27(4): 5570-5580.
- [12] 王剑南,李伟,刘杰涛,等. 基于三步相移干涉法的光学传输矩阵测量与聚焦[J]. 中国激光, 2018, 45(8): 0804007.
WANG J N, LI W, LIU J T, *et al.* Measuring optical transmission matrix based on three steps phase shift interferometry and focusing [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(8): 0804007. (in Chinese)
- [13] 唐信. 基于遗传算法波前整形的光透过散射介质快速聚焦的方法研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2018.
TANG X. Research on the rapid optical focusing of laser after the wavefront shaping based on the genetic algorithm penetrating scattering medium [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2018. (in Chinese)
- [14] LI H R, WU X Y, LIU G D, *et al.* Generation of focal patterns with uniform intensity distribution from speckle by hadamard-genetic algorithm [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2021, 13(3): 5000108.

作者简介:



张 峰(1986—),男,湖南吉首人,博士,高级工程师,2014年于北京交通大学获得博士学位,主要从事系统设计、仿真分析、算法等方面的研究。E-mail: zhangfeng11@cetc.com.cn



杨海宁(1986—),男,江苏南京人,博士,教授,2014年于英国剑桥大学获得博士学位,主要从事LCOS技术在通信和成像方面的研究。E-mail: h. yang@seu.edu.cn