

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2020.01.004

光束发射参数对蓝绿激光海洋传输特性的影响

周田华, 范婷威, 马剑, 陆婷婷, 胡谷雨, 朱小磊, 陈卫标

(中国科学院上海光学精密机械研究所空间激光信息传输与探测技术重点实验室, 上海 201800)

摘要: 蓝绿激光位于海水低损耗窗口区, 由于水体吸收和散射, 光束在水下传输将发生时空扩展和波形畸变。基于蒙特卡罗仿真分析了蓝绿激光海洋传输特性, 特别是激光发射参数对接收光场分布的影响。提出通过调节发射端的光束发射参数, 对发射光束进行预聚焦, 可在一定程度上抵消水体传输引起的光束扩散影响。分析和仿真结果表明, IB 水体中, 当预聚焦角度与水体小角度散射特征值相当时, 可在设计汇聚距离前形成一段光束扩散缓慢的平坦传输区域; 当预聚焦角度大于小角度散射特征值的 2 倍时, 可在设计聚焦距离附近形成汇聚效果; 预聚焦角度越大, 汇聚效果越明显; 水体变差时, 相应有效汇聚距离变短。研究成果为调控蓝绿激光信号在海水的传输特性提供了一种新的思路。

关键词: 蓝绿激光; 蒙特卡罗仿真; 光束预聚焦; 散射; 海洋传输特性

中图分类号: TN929.1

文献标识码: A

文章编号: 1673-6141(2020)01-0040-08

Influence of Beam Parameters on Propagation of Blue Green Laser Underwater

ZHOU Tianhua, FAN Tingwei, MA Jian, LU Tingting, HU Guyu,
ZHU Xiaolei, CHEN Weibiao

(Key Laboratory of Space Laser Communication and Detection Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract: The blue-green spectrum in the range of 450~550 nm is the only low loss optical window of seawater. Due to the absorption and scattering of water, the underwater propagation of the laser beam will have time-space expansion and waveform distortion. Based on Monte Carlo simulation, the propagation characteristics of blue-green laser in seawater have been analyzed, especially the influence of laser emission parameters on the distribution of receiving light field. By adjusting the beam parameters of the transmitter and focusing the laser beam in advance, the influence of beam diffusion caused by underwater transmission can be eliminated to some extent. The analysis and simulation results show that when the pre-focusing angle is equal to the small angle scattering eigenvalue of water, a flat transmission area with slow spread of laser beam can be formed in Jerlov type IB water before the designed focus distance. When the pre-focusing angle is greater than twice the

基金项目: Supported by the Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (中国科学院 A 类战略性先导科技专项, XDA22000000), Ministry of Science and Technology of China (科技部 863 计划, 2014AA093301), Natural Science Foundation of Shanghai (上海市青年扬帆计划, 19YF1453600)

作者简介: 周田华 (1981 -), 男, 江西临川人, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事蓝绿激光海洋传输特性及其在通信和探测中的应用方面的研究。 **E-mail:** siomzth@siom.ac.cn

收稿日期: 2019-11-25; **修改日期:** 2019-12-06

scattering angle of water, the convergence effect can be formed near the designed focus distance, and the focus effect is proportional to the pre-focusing angle. When the water quality becomes worse, the corresponding effective focus distance becomes shorter. The research results provide a new way to improve the transmission characteristics of blue-green laser signal in seawater.

Key words: blue-green laser; Monte Carlo simulation; beam pre-focusing; scattering; ocean propagation characteristics

1 引言

地球超过 70% 的面积被海洋覆盖。受限于趋肤效应, 可用于海水中长距离传输的技术手段有限, 主要为长波和水声。蓝绿光处于海水的低损耗谱段窗口区域, 可在水下传输数百米距离^[1]。利用蓝绿激光作为载波, 将信息编码调制后加载到蓝绿激光上, 进一步结合高灵敏度探测接收技术和信息的解调译码, 可以在海水中实现较长距离的水下高速通信, 为水下通信提供一种新的技术手段。由于水体的吸收和散射作用, 发射的蓝绿激光光束经过水下长距离传输后, 其角度分布、能量分布、空间分布和时间分布等特性都发生了变化^[2]。长距离高速蓝绿激光通信系统的设计有赖于对水下信道传输特性的掌握。对蓝绿激光海洋传输特性的研究将可以指导设计系统参数, 评估系统性能, 为系统总体方案的优化奠定基础。

目前水下信道特性的研究主要采用辐射传输方程和数值模拟仿真两种手段。求解辐射传递方程相对困难, 数值模拟仿真借助于计算机的强大计算能力, 已经越来越被广泛使用。通常水下信道模拟仿真主要基于发射参数, 仿真光信号经过水体后的接收情况, 少有人分析发射光束形状和角度对蓝绿激光传输特性的影响^[3-5]。本文创新提出利用光束预聚焦改善蓝绿激光海洋传输时空扩展特性的技术途径, 首先通过蒙特卡罗 (Monte Carlo, MC) 方法, 针对高斯光束下不同预聚焦角度, 仿真分析了不同传输距离后接收面上的光场分布; 其次从接收面光场分布变化的角度, 对照分析经过不同传输距离后的光场分布是否存在汇聚效果, 汇聚的规律, 以及水体参数变化对汇聚效果的影响; 最后通过设计合适的预聚焦角度, 可以在一定程度上抵消水体散射引起的光束扩散效应, 实现光束在水下传输过程中的汇聚, 或者在一定距离上实现接收光场的缓慢变化。这将为调控蓝绿激光海洋传输特性、优化蓝绿激光水下信息传输系统和探测系统的设计提供一种新的思路。

2 蓝绿激光海洋传输特性

2.1 海水光学传输特性

海水的的光学特性可由固有光学特性和表观光学特性来表示。表观光学特性由光场和水体成分共同决定, 可由遥感测量或者现场测量的方式获取; 固有光学特性只与水体成分有关, 不随光照条件变化而变化, 主要有海水吸收系数 a 、散射系数 b 、体积散射函数 $\beta(\theta)$ 和衰减系数 c 等。衰减系数为吸收系数和散射系数的和, $c = a + b$, 同时定义反照率 $\bar{\omega} = b/c$ ^[6]。这里主要针对海水固有光学特性进行分析。海水的吸收主要由水体本身的吸收、悬浮粒子吸收, 以及黄色物质 / 有色可溶有机物的吸收组成, 会导致光束传输时的信号幅度衰减, 是传输距离受限的主要因素。体积散射函数 $\beta(\theta)$ 定义为在 θ 方向单位散射体积、单位立体角内散射辐射强度与入射在散射体积上的辐照度之比, 描述了光子被散射到某一角度的概率, 可划分为纯水体积散射函数和颗粒的体积散射函数。散射系数为 4π 立体角空间内体积散射函数积分 $b = \int_0^{4\pi} \beta(\theta) d\omega$, 海水的散射又可分为前向散射 b_f 和后向散射 b_b 两大部分, 其中 $b = b_f + b_b$, 是导致时空展宽、带宽受限的主要因素。对于水下信息传输系统而言, 前向散射 b_f 是主要关注部分; 对于水下激光探测系统而言, 后向散射 b_b 是主要关注部分。蓝绿激光处于海水的低损耗窗口区域, 也是目前唯一可用的水下长距离应用光谱区域, 其传输特性与水质密切相关^[7-9]。针对海水, Jerlov 将其主要划分为 I、IA、IB、II 和 III 五大类, 常用的绿光 532 nm 典型的衰减系数和散射系数如表 1 所示^[10]。

表 1 海水水体光学参数

Table 1 Optical parameters of seawater

Water parameter	$a(\text{m}^{-1})$	$b(\text{m}^{-1})$	$c(\text{m}^{-1})$	$\bar{\omega}$
Jerlov IB	0.060	0.084	0.144	0.58
Jerlov II	0.076	0.227	0.303	0.75
Jerlov III	0.104	0.452	0.556	0.81

根据比尔朗伯定律, 准直光束在海水中传输一定的距离 L 后, 仍然保持准直状态的光束能量为 $E_R = E_0 e^{-cL}$, E_0 为初始能量, 其余的转化为散射光能或被水体吸收, 导致准直光场逐渐向漫射光场过渡^[11-12]。基于表 1 参数, 优于 II 类水体下, 蓝绿激光可在水下传输数百米距离, 具有良好的应用前景^[13]。由于水下光束传输时的散射源主要是大小可与波长比拟的悬浮粒子和生物组织, 因此光束传输是以前向散射占优势的 Mie 散射为主, 光束的空间角度以小角度逐渐扩展。对于优于 II 类水体的洁净水体, 存在典型的小角度散射特征值, IB 水体下, 小角度特征值通常在 $3\sim 5^\circ$ ^[14-15]。

2.2 蓝绿激光传输的蒙特卡罗模拟仿真

MC 仿真方法本质上是一种穷举式数值计算仿真, 随着研究的推进, 科研人员对在多重散射介质中光辐射传输的最初 MC 方法进行了多种改进和优化, 使它广泛应用于光辐射在大气、海洋、云层和生物组织等领域的研究^[16-18]。MC 用于激光传输仿真时, 追踪每个光子包的传输轨迹, 进而得到整个光场随时间的分布变化。MC 方法所固有的统计特性决定了需要使用大量的计算机随机产生的光子传输事件, 因此计算量大是这种方法的缺点, 但其结果是准确的。1993 年 Mobley 等人采用不变注入法、离散坐标法和 MC 法对水下光场的计算做了比较, 得到了基本类似的结果^[19]。2003 年 Gjerstad 等人使用 MC 方法进行了光辐射在大气海洋体系的传输研究, 并对比了它与离散坐标法的计算结果, 也证实这两种模型可以得到相似的结果^[20]。

蓝绿激光水下传输仿真中将发射的光子看成由很多个光子组成的光子包, 并给每一个光子包赋予一个权值, 每次散射发生时, 光子包的权值按照反照率缩小。光子包的传输示意如图 1 所示。根据发射端的发散角, 初始传播方向以及光斑分布。初始光子包的生成包括空间能量分布初始化和入射角初始化。初始化参数包括初始能量 E_P 、初始位置 (x, y, z) 、初始传输方向 (u_x, u_y, u_z) 和发射时间 τ_0 。各个光子包根据其初始位置 (x, y, z) 不同, 其能量 E_P 按照常见的高斯分布 $n(\mu, \sigma^2)$ 进行抽样。初始传播方向取决于光源的发散角。各个光子包沿传输方向 \vec{r}_0 传输, 当传输到一定的距离 l_R (称为随机步长) 后, 到达散射点并发生散射^[21]。

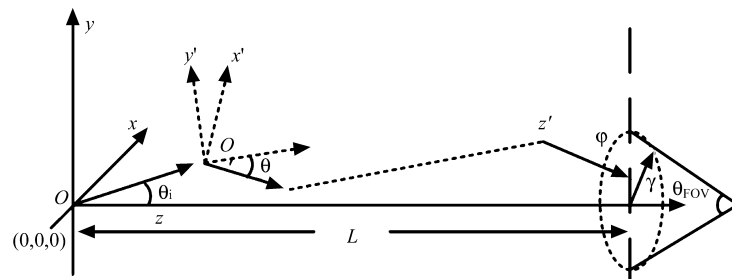


图 1 光子包传输示意

Fig.1 Schematic diagram of photon packet transmission

采用 MC 方法, 选取 IB、II 和 III 三类水体, 对蓝绿激光经过不同距离海水传输后的能量衰减、空间扩散和角度分布进行仿真分析, 仿真结果如图 2 所示。图 2(a) 表明, 对于能量衰减而言, IB 类水体下,

传输 80 m 引起的衰减不到 25 dB, III 类水体时急剧增加到近 55 dB; 图 2(b) 表明, 对于光束空间扩展而言, 随着传输距离的增加, II 类水体和 III 类水体相对于 IB 类水体明显增加, III 类水体时, 80 m 距离下光束半径扩展到近 40 m, 几乎与传输距离相当; 图 2(c) 表明, 对于接收面的到达角而言, IB 水体下主要集中在 500 mrad 以内, 要小于 II 类和 III 类水体的 650 mrad, 表明后两者光束弥散明显。上述仿真结果与海洋光学理论相符, 与其他公开发表的结果趋势也基本吻合 [22-24]。基于上述仿真结果, 可见通过 MC 仿真, 可以对蓝绿激光海洋传输特性进行有效的仿真, 仿真结果可以为系统设计和性能预测提供参考。

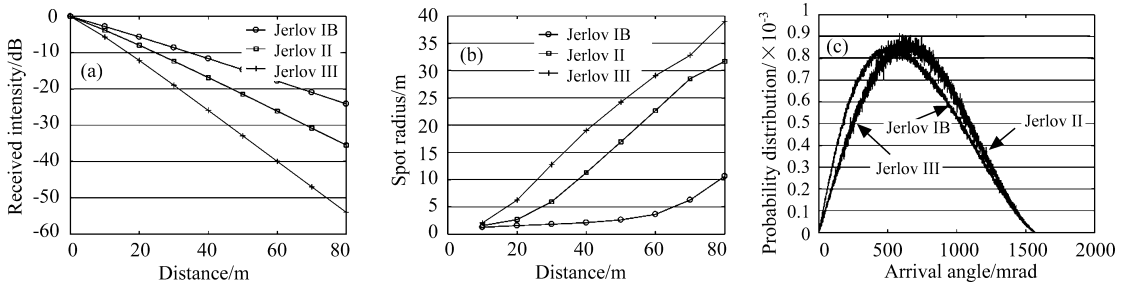


图 2 不同水质下的蓝绿激光光学传输特性。(a) 接收信号强度随传输距离变化; (b) 接收面光斑拟合半径随距离变化; (c) 接收面光子包到达角度分布

Fig.2 Propagation characteristics of blue-green laser under different water type. (a) Variety of received intensity with the transmission distance; (b) variety of the spot radius with the transmission distance; (c) arrival angle distribution on the receiving plane

3 光束发射参数的影响

针对蓝绿激光信息传输和探测系统, 目前开展的信道特性研究, 通常都是通过将发散角扩大用于实现宽视场通信并辅助于高灵敏度探测接收, 或者将发射光束角度变小至近似准直用于实现高速通信和提升探测距离, 尚未看到针对水下不同应用距离, 通过将发射光束的发散角预先聚焦, 形成远端汇聚效果, 以改善综合性能的研究 [25-28]。蓝绿激光在海水中传输时, 传输方向主要以前向散射为主, 对于洁净水质, 可以用小角度散射来进行近似, I 类水体的典型散射角约为 3~5°。为了在一定程度上传输更远距离, 应该想方设法抵消此散射角度的影响, 减小光束的扩散速度, 当工作距离确定时, 如果能在工作距离接收面上形成汇聚效应, 则更为理想。为此我们创新提出从光束发射参数入手, 基于发射端光束预聚焦, 补偿激光光束在水体中的扩散效应, 为提高蓝绿激光有效传输距离提供了一种新的技术手段。基本原理如图 3 所示,

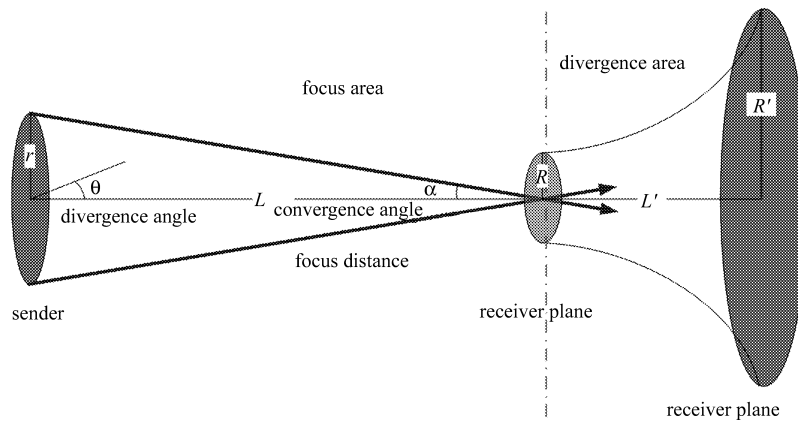


图 3 预聚焦原理示意

Fig.3 Schematic diagram of laser beam pre-focusing

对于预定聚焦距离 L , 可在发射端设计聚焦角 α , 形成的效果是在聚焦区域内传输 L 距离后, 远端光束汇聚到最小。该角度有别于通常表征光束发射程度的发散角 θ , 其是在传输一定距离后, 光束发散到相应的尺寸。当光束传输到预定聚焦距离 L 后继续传输, 聚焦效应转换为发散效应, 在后续传输距离 L' 内, 光束持续发散。基于上述定性分析, 在预定聚焦距离 L 内, 由于光束的汇聚效应, 将在一定程度上抵消水体自身的散射效应, 减缓光束扩展; 当超出 L 后, 将形成光束发射和水体散射的双重叠加效应, 加速光束扩展。

基于上述定性分析, 采用预聚焦方式可以在一定程度抵消汇聚区域水体本身引入的小角度前向散射。当预聚焦角度大于水体本身的前向小角度散射特征值时, 可以在设计焦距前呈现汇聚的效果, 当预聚焦角度进一步增大时, 可以在设计聚焦距离附近实现光束的汇聚。当传输距离大于设计的聚焦距离时, 汇聚效果转变为发散效应, 再叠加上海水体本身的小角度散射, 弥散效应将得到增强, 光束将加速扩散。

3.1 预聚焦角度影响

基于小角度散射理论, 在清洁水体中, 激光束在水下传输时将不断以散射特征角进行扩散^[14-15]。设计采用预聚焦角进行补偿, 当预聚焦角度大于散射特征角时, 可以很大程度补偿扩散效应, 当角度进一步增大时, 应该可以实现聚焦效果。为此针对 IB 水体, 以特征角 3° 为参照, 改变发射端光斑参数, 形成预聚焦角度, 采用蒙特卡罗方法对传输过程中接收面的光束形状进行考察。

仿真结果如图 4 所示, X 轴为传输距离, Y 轴为统计的对应距离接收面上的光斑拟合半径。以 60 m 的设计聚焦距离为例, 图 4(a) 是发射光束预聚焦角度为 0.19° 时的情形, 预聚焦角度很小, 难以抵消小角度散射影响, 几乎对光束传输不产生影响; 图 4(b) 的发射光束预聚焦角度为 4.3° , 随着预聚焦角度的增加, 一定程度抵消了水体自身的小角度前向散射, 传输光束出现了汇聚效果, 中间开始出现了一段相对平坦区, 扩散速度减慢, 超出 60 m 距离后重新发射, 并且发散速度明显加快, 原因在于经过焦点后汇聚变成了发散, 与水体散射的发射效应叠加, 弥散速度加快; 图 4(c) 的发射光束预聚焦角度继续增加到约为 8.53° (大于小角度散射特征角 3° 的 2 倍即 6°), 光束在预定距离形成了明显的汇聚效果, 小角度散射引起的扩散很大程度上被抵消, 达到了聚焦的目的, 与图 4(b) 类似, 在预定汇聚距离后, 由于汇聚效应变成了发散, 弥散更快。

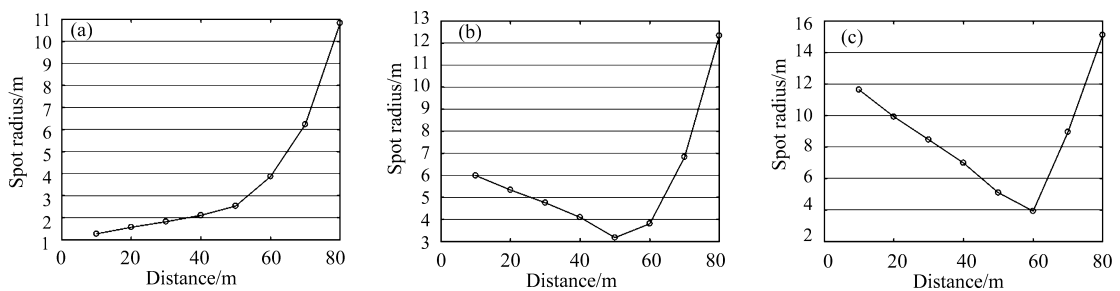


图 4 焦距 60 m, 不同发射光束聚焦角下的光束传播情形。(a) 聚焦角 0.19° ; (b) 聚焦角 4.3° ; (c) 聚焦角 8.53°

Fig.4 Beam propagation at different focus angles with focus length of 60 m. (a) Focus angle of 0.19° ;

(b) focus angle of 4.3° ; (c) focus angle of 8.53°

为了进一步证实汇聚效果, 选取预聚焦角度为约 20° (远大于小角度散射特征角 3° 的 2 倍即 6°), 设计聚焦距离 60 m, 仿真分析了设计距离处, 以及前后各 10 m 的二维光场分布情况, 也即 50、60 和 70 m 距离下的光场分布, 结果如图 5 所示, 明显看出 60 m 的光斑中心最为集中, 有效半径最小。光斑前后都明显比它要大而且弥散, 表明形成了明显的汇聚, 直观验证了聚焦效果。

光束汇聚是一个很好的结果, 但是需要的汇聚角较大, 对发射光学天线口径要求很高。在实际应用时, 如果减小预聚焦角度, 并非形成汇聚, 而是形成一段相对平坦区, 同样具有非常重要的实际意义。对于同一 IB 水质, 瞄准 60 m 作为聚焦距离, 选取预聚焦角 $1\sim 3^\circ$ 进行仿真 (该角度范围与 IB 水体下的小角

度散射特征值相当), 对平坦效果进行分析, 可以发现整体呈现出了平缓变化的传输特性。当预聚焦角度为 1.43° , 仿真结果如图 6 所示, 在 40 m 距离内获得了非常稳定的光场分布, 接收平面上的光束半径基本维持在 2 m 左右, 光场扩散缓慢, 有助于实现水下激光信号的稳定传输和探测。

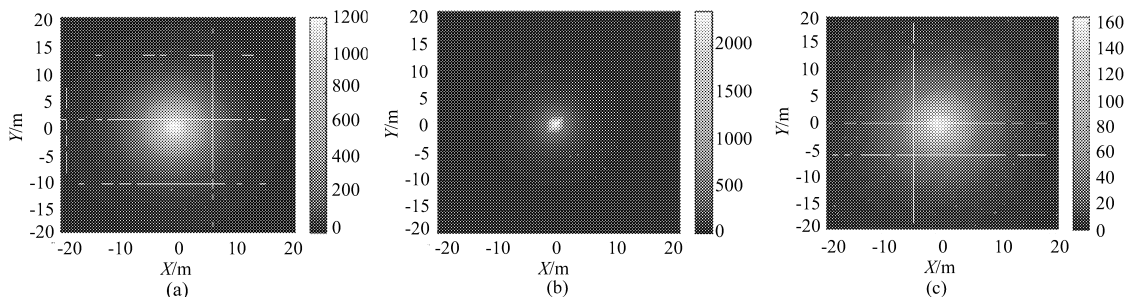


图 5 预聚焦角度约 20° 、焦距 60 m 时的不同距离光场分布。(a) 50 m; (b) 60 m; (c) 70 m

Fig.5 Light field distribution at different distances with focus angle of 20° and focus length of 60 m.

(a) 50 m; (b) 60 m; (c) 70 m

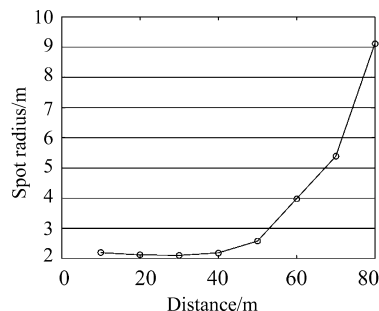


图 6 预聚焦角度为 1.43° 、设计聚焦距离为 60 m 时实现的平坦传输

Fig.6 Flat transmission area with focus angle of 1.43° and designed focus length of 60 m

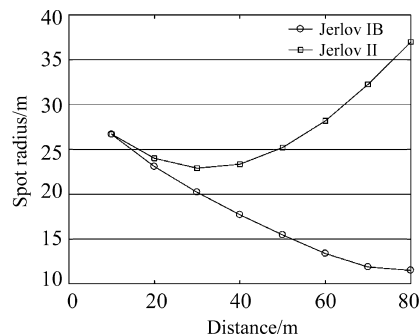


图 7 不同水质下的汇聚效果对照

Fig.7 Comparison of the convergence effect under different water quality

3.2 水质影响

基于汇聚效果与小角度散射特征值相关, 可以推论随着水质参数的变化, 散射系数发生改变, 小角度特征值发生相应变化, 汇聚效果将随之变化。水体越清洁, 所需要的预聚焦角度越小; 水体越浑浊, 汇聚效果将会变差。针对 IB 和 II 类水体进行对照仿真, 设计汇聚距离为 80 m, 预汇聚角为 14° , 仿真结果如图 7 所示。由图可见水质对聚焦效果有明显影响, IB 水质下光束可以在有效汇聚距离前一直保持汇聚, 而水质变差后, 汇聚距离由于散射特征角的增加而大幅缩短, II 类水体的实际汇聚距离减小到了约 40 m, 与聚焦角度变小的效果类似。究其根源, 效果变差的主要因素是散射系数的增加, 导致散射特征角增加, 使得汇聚效果难以抵消发散效果, 散射系数越大, 有效汇聚距离越短。

4 数据分析与讨论

仿真分析了不同水质和不同聚焦角度下, 设计汇聚距离与仿真所得有效传输距离的差异。通过改变发射光束的预聚焦角度, 以瞄准聚焦距离 60 m 为参考, 当发射光束预聚焦角度达到 20° 时, 聚焦效果非常好, 完全达到预定聚焦距离; 当预聚焦角度 8.53° 时, 聚焦效果良好, 基本达到预定聚焦距离; 当预聚焦角度 4.3° 时, 可以呈现汇聚效应, 但实际汇聚距离短于设计汇聚距离; 当选取发射光束预聚焦角度 1.43° 时, 可以在预定聚焦距离前形成一段相对稳定的平坦传输区, 40 m 以内光斑半径基本维持在 2 m 左右,

变化很小;当发射光束预聚焦角度 0.19° 时,对光束传输未产生明显影响。

上述仿真主要针对 IB 水体开展,由于散射系数较小,近似可用小角度散射来近似,散射角度特征值约为 $3\sim 5^\circ$,综合预聚焦角度、预聚焦效果以及与散射角度特征值的比较,可以将预聚焦角度初步划分为三个区域: 1) 有效汇聚区: 预聚焦角度 $\geq 2\times$ 散射特征角; 2) 汇聚提前区: 散射特征角 \leq 预聚焦角度 $< 2\times$ 散射特征角; 3) 平缓传输区: $0.3\times$ 散射特征角 \leq 预聚焦角度 $<$ 散射特征角。

5 结 论

提出了采用预聚焦改变水下传输光场分布的设想,并采用 MC 方法开展了数值计算仿真,给出了预聚焦角度对水下光束传输光场的影响,仿真数据分析结果表明,根据需要的传输距离进行针对性设计,可使得光场汇聚或平坦传输,从光场调控的角度为水下激光的应用给出了新的可能。结合工程应用,特别设计聚焦角度与特征角相当时,可以在预定聚焦距离前形成一段相对稳定的平坦传输区,光斑尺寸变化很小,有利于信息的传输和探测应用。研究主要侧重仿真分析,后续可进行理论公式推导,并综合数值仿真结果进行拟合,基于该理论公式,针对不同水质和作用距离进行相应的参数优化设计。此外,光束聚焦并非最终目的,最终是希望光束聚焦时接收到的光信号功率增加。因此,综合考虑发射端的光场分布,以及接收面光场分布的峰值强度变化,应该存在着一个折中的汇聚角度,使得接收面的信号幅度增益最大,通过公式推导有望得出最优值。综上,通过对光束发散参数的优化设计,有望改善蓝绿激光海洋信息传输系统和探测系统的综合性能,后续通过进一步的细化仿真和理论分析,将为调控蓝绿激光海洋传输特性、优化蓝绿激光通信系统和激光雷达系统的设计提供一种新的思路。

参考文献:

- [1] Kaushal H, Kaddoum G. Underwater Optical Wireless Communication [J]. *IEEE Access*. 2016, 4(11): 1518-1547.
- [2] Wei W, Zhang X H, Rao J H, et al. Time domain dispersion of underwater optical wireless communication [J]. *Chinese Optics Letters*. 2011, 9(3): 030101-4.
- [3] Hu X H, Zhou T H, He Y, et al. Monte Carlo simulation of laser pulse after underwater propagation [J]. *Proceedings of SPIE*. 2013, 8906: 89061A-7.
- [4] Gjerstad K I, Stamnes J J, Hamre B, et al. Monte Carlo and discrete-ordinate simulations of irradiances in the coupled atmosphere-ocean system [J]. *Applied Optics*. 2003, 42(15): 2609-2622.
- [5] Lerner R M, and Summers J D. Monte Carlo description of time-and space-resolved multiple forward scatter in natural water [J]. *Applied Optics*. 1982, 21(5): 861-869.
- [6] Shifrin K S. Physical Optics of Ocean Water [J]. *Journal of Colloid & Interface Science*. 1988, 126(1): 386-392.
- [7] Hojevslev N K. *Optical Properties of Pure Water and Pure Sea Water* [M]. Berlin Heidelberg: Springer, 1986.
- [8] Smith R C, Austin R W, Petzold T J. *Volume-Scattering Functions in Ocean Waters* [M]. US: Springer, 1974.
- [9] Solonenko M G, Mobley C D. Inherent optical properties of Jerlov water types [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(17): 5392-5401.
- [10] Jerlov N G. *Marine Optics* [M]. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company, 1976.
- [11] Xu Qiyang. *Blue-Green LIDAR Ocean Survey* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002(in Chinese).
徐启阳. 蓝绿激光雷达海洋探测 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- [12] Schippnick P F. Phenomenological model of beam spreading in ocean water [J]. *Proceedings of SPIE, Ocean Optics X*, 1990, 1302: 13-37.

- [13] Hu S Q, Mi L, Zhou T H, *et al.* 35.88 attenuation lengths and 3.32 bits/photon underwater optical wireless communication based on photon-counting receiver with 256-PPM [J], *Optics Express*, 2018, **26**(17): 21685-21699.
- [14] Van de Hulst H C, Kattawar G W. Exact spread function for a pulsed collimated beam in a medium with small-angle scattering [J], *Applied Optics*, 1994, **33**: 5820-5829.
- [15] Arnush D. Underwater light-beam propagation in the small-angle-scattering approximation [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1972, **62**(9): 1109-1111.
- [16] Vali Z, Gholami A, Ghassemlooy Z, *et al.* Modeling turbulence in underwater wireless optical communications based on Monte Carlo simulation [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2017, **34**(7): 1187-1193.
- [17] Jia Hao, Chen Bin, Li Dong, *et al.* Unstructured grid based Monte Carlo method for the simulation of light propagation in skin tissues [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, **42**(04): 87-94(in Chinese).
贾浩, 陈斌, 李东, 等. 模拟皮肤组织中光传播的非结构化网格蒙特卡罗法 [J]. *中国激光*, 2015, **42**(04): 87-94.
- [18] Sun X M, Xiao S, Wang H H, *et al.* Transportation of Gaussian light beam in two-layer clouds by Monte Carlo simulation [J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, **64**(18): 184204-6(in Chinese).
孙贤明, 肖赛, 王海华, 等. 高斯光束在双层云中传输的蒙特卡罗模拟 [J]. *物理学报*, 2015, **64**(18): 184204-6.
- [19] Mobley C D, Gentili B, Gordon H R, *et al.* Comparison of numerical models for computing underwater light fields [J]. *Applied Optics*, 1993, **32**(36): 7484-7504.
- [20] Gjerstad K I, Stamnes J J, Hamre B, *et al.* Monte Carlo and discrete-ordinate simulations of irradiances in the coupled atmosphere-ocean system [J]. *Applied Optics*, 2003, **42**(15): 2609-2622.
- [21] Hu X H, Hu S Q, Zhou T H, *et al.* Rapid estimation of the maximum communication distance for an underwater laser communication system [J], *Chinese Journal of Lasers*, 2015, **42**(8): 175-183(in Chinese).
胡秀寒, 胡思奇, 周田华, 等. 水下激光通信系统最大通信距离的快速估计 [J]. *中国激光*, 2015, **42**(8): 175-183.
- [22] Gabriel C, Khaligh M A, Léon P, *et al.* Monte-Carlo-based channel characterization for underwater optical communication systems [J]. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications & Networking*, 2013, **5**(1): 1-12.
- [23] Bogucki D J, Piskozub J, Carr M E, *et al.* Monte Carlo simulation of propagation of a short light beam through turbulent oceanic flow [J]. *Optics Express*, 2007, **15**(21): 13988-13996.
- [24] Li J, Ma Y, Zhou Q, *et al.* Channel capacity study of underwater wireless optical communications links based on Monte Carlo simulation [J]. *Journal of Optics*, 2012, **14**(1): 015403-7.
- [25] Hu S, Mi L, Zhou T, *et al.* Viterbi equalization for long-distance, high-speed underwater laser communication [J]. *Optical Engineering*, 2017, **56**(7): 076101-10.
- [26] Hanson F, Radic S. High bandwidth underwater optical communication [J]. *Applied Optics*, 2008, **47**(2): 277-283.
- [27] Baiden G, Bissiri Y, Masoti A. Paving the way for a future underwater omni-directional wireless optical communication systems [J]. *Ocean Engineering*, 2009, **36**(9): 633-640.
- [28] Baghdady J, Miller K, Morgan K, *et al.* Multi-gigabit/s underwater optical communication link using orbital angular momentum multiplexing [J]. *Optics Express*, 2016, **24**(9): 9794-9805.