文章编号:1001-5078(2009)06-0581-03　　·激光技术与应用·

一种计算水下高斯光束远场光强分布的方法

吴广成,张晓晖,饶炯辉
(海军工程大学兵器工程系,湖北 武汉 430033)

摘　要:在平行细光束水下传输的唯像模型基础上,通过对自由空间中高斯光束光强分布规律的分析,将高斯光束分解成多条平行细光束,推导了计算水下高斯光束远场光强分布的数学模型,分析了光强随水体衰减系数、传输距离、散射角变化的规律,并进行实验验证。计算与实验结果基本吻合。

关键词:高斯光束;唯像模型;光强
中图分类号:TN249　　**文献标识码**:A

Algorithm of intensity distribution of underwater Gauss laser beam in far-field

WU Guang-cheng, ZHANG Xiao-hui, RAO Jiong-hui
(Dept. of Weaponry Eng., Naval Univ. of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: On the basic of phenomenological model of underwater collimation laser beam, the algorithm of intensity distribution of underwater Gauss laser beam in far-field is set up by analyzing the law of intensity distribution of Gauss laser beam in air and disassembling Gauss laser beam into lots of collimation laser beam. The expression of intensity varying against the optical attenuation coefficient of water, the propagating ranges and the scattering angles is presented. Finally the model is verified by experiments, and the experiment results show that the calculated data is in good agreement with the measured data.

Key words: Gauss laser beam; phenomenological model; intensity

1　引　言

海水是一个复杂的物理、化学、生物系统,它主要由纯水、溶解物质和悬浮体组成[1]。当光在水体中传输时,主要受到水体的吸收和散射作用,而且水体对光的衰减程度随着水质的不同而不同。水下对于激光探测系统来说是一个新环境,因此,弄清高斯光束的水下传输规律对于高斯光束水下目标探测系统的设计无疑具有非常重要的意义[2-3]。目前国内外关于激光束水下传输特性的研究都将其视为准直光束[4-6],但计算水下高斯光束光强分布的数学模型却尚未见报道。本文在平行细光束水下传输的唯像模型[7-8]基础上,通过对自由空间中高斯光束光强分布规律的分析,将高斯光束分解成多条平行细光束,推导了计算水下高斯光束远场光强分布的数学模型,分析了光强随水体衰减系数、传输距离、散射角变化的规律,并进行实验验证。实验结果表明,本文推导的数学模型可以较为准确地解析水下高斯光束远场光强分布特性。本文的研究可为水下激光目标探测系统的设计和应用提供依据和参考。

2　平行细光束水下传输的唯像模型

图 1 为平行细光束在水下传输的示意图。以平行细光束传输方向为 Z 轴建立柱坐标,激光器出光口处为 Z 轴的原点 O。在传输距离 z 处的横截面 $XO'Y$ 上任意点 M 的坐标为(r,φ,z),r 为点 M 到横截面原点 O'的距离,φ 为从线段 $O'M$ 到 X 轴的角

作者简介:吴广成(1982 -),男,硕士生,主要从事水下光电对抗的科研工作。E-mail:wuguangcheng505@163.com
收稿日期:2008-12-03

度。由于横截面上光斑光强是圆对称分布的,可以不考虑 φ 的影响,在此只需研究 X 轴上的光强径向分布即可。

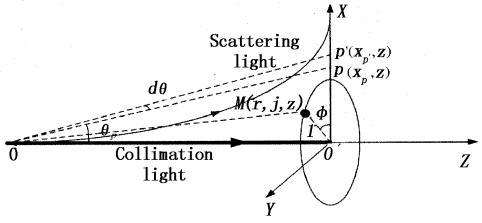


图 1 平行细光束在水下传输示意图

在水下传输的平行细光束光强可以分成两部分:一部分为直射光强,另一部分为散射光强。直射光强表示初始细光束在传输了一定距离 z 后仍然保留直射光状态,其表达式为:

$$I_d(z)=I_0(0)e^{-cz} \tag{1}$$

其中,$I_0(0)$ 为初始光强,令 $I_0(0)=1$;c 为海水衰减系数。

散射光强表示初始平行细光束经水体的散射作用,偏离了原来的传输方向,在传输方向外的光强。根据文献[7]、[8]的研究,散射角 θ_p 以内球帽的散射光通量可以表示为:

$$\Phi_s(\theta_p,z)=F_s(\theta_p,z)(\Phi(\pi,z)-e^{-cz}) \tag{2}$$

式中,$\Phi_s(\theta_p,z)$ 表示在传输距离 z 处散射角 θ_p 以内球帽的散射光通量;$F_s(\theta_p,z)$ 表示散射光通量占总散射光通量的比例;$\Phi(\pi,z)$ 表示水下散射光与直射光在传输距离 z 处的总光通量;$(\Phi(\pi,z)-e^{-cz})$ 则表示在传输距离 z 处的总散射光通量。

根据式(2)可以分别求出 θ_p 和 $(\theta_p+\mathrm{d}\theta)$ 角以内球帽的散射光通量,那么如图 1 所示,细光束在传输距离 z 处与 Z 轴夹角为 θ_p 方向上(即 P 点处)的散射光强为:

$$I_s(\theta_p,z)=\frac{\mathrm{d}\Phi_s(\theta_p,z)}{\mathrm{d}\Omega(\theta_p)} \tag{3}$$

3 计算水下高斯光束远场光强分布数学模型的推导

为了研究水下高斯光束光强的传输规律,本文将高斯光束分解成为多条平行细光束,再根据平行细光束在水下传输时直射光和散射光光强的计算公式(1)和式(3),分别计算每条细光束在传输距离 z 处各点的光强分布,然后对各点的光强叠加,则可得到水下高斯光束的光强分布规律。

3.1 高斯光束在自由空间中的光强分布规律

为了合理地将高斯光束细分为多条平行细光束,分析了高斯光束在自由空间中的光强分布规律。图 2 为高斯光束在自由空间中传输的示意图,其中以高斯光束中心传输方向为 Z 轴。

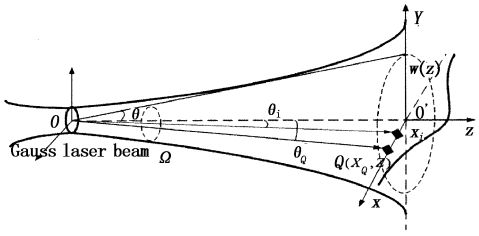


图 2 高斯光束在自由空间中传输示意图

当只考虑水下高斯光束远场光强分布特性时,设远场发散角(半角)为 θ_0,则 (x_i,z) 点的光强(即水下高斯光束在传输距离 z 处 θ_i 方向上的光强)可表示为:

$$I_0(\theta_i,z)=I_0(0,0)\left(\frac{\lambda}{\pi\theta_0^2\cdot z}\right)^2\exp\left(-2\frac{\tan^2\theta_i}{\theta_0^2}\right) \tag{4}$$

若将初始光强为 $I_{0\mathrm{gauss}}$ 的高斯光束看成由 $N\times N$ 条平行细光束组成,用 $I_0(\theta_{ij},z)$ 表示在传输距离 z 处的横截面内沿 θ_{ij} 方向传输的平行细光束光强,则有:

$$I_{0\mathrm{gauss}}=\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}I_0(\theta_{ij},z) \tag{5}$$

上式可称为高斯光束光强的离散表达式,其中当 i 或 j 为固定值时,$I_0(\theta_{ij},z)$ 满足式(4)的分布规律。

3.2 水下高斯光束远场光强分布的数学计算模型

高斯光束在水下传输时,在横截面上任意点 Q 处(其坐标为 (x_Q,z))的光强包括两部分:一部分为其中一条平行细光束直接传输到该点的直射光强,另一部分为沿其他方向传输的 $(N\times N-1)$ 条平行细光束在该点的散射光强。

根据式(1)和式(4)可以求出在 Q 点处的直射光强为:

$$I_d(\theta_Q,z)=I_0(\theta_Q,z)\exp(-cz/\cos\theta_Q) \tag{6}$$

其中,$I_d(\theta_Q,z)$ 表示初始光强为 $I_0(\theta_Q,z)$ 的平行细光束在水下沿 θ_Q 方向传输了 $z/\cos\theta_Q$ 距离后在点 Q 处的直射光强。显然,当衰减系数 $c=0$ 时,$I_d(\theta_Q,z)$ 正是按式(4)所描述的自由空间光强径向分布规律衰减。

根据式(3)可以求出沿 $\theta_{ij}\neq\theta_Q$ 方向传输初始光强为 $I_0(\theta_{ij})$ 的平行细光束在点 Q 处散射光强为 $I_s(|\theta_{ij}-\theta_Q|,z)$,其中 $|\theta_{ij}-\theta_Q|$ 表示 θ_{ij} 方向相对于 θ_Q 方向的散射角。则高斯光束在点 Q 处的总散射光强为所有沿 $\theta_{ij}\neq\theta_Q$ 方向传输的平行细光束在点 Q 处散射光强的总和,即:

$$I_s(\theta_Q,z)=\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}(|\theta_{ij}-\theta_Q|,z)\quad \theta_{ij}\neq\theta_Q \tag{7}$$

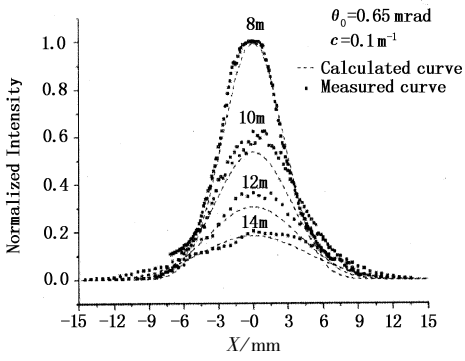
那么高斯光束在点 Q 上的总光强为:

$$I_t(\theta_Q,z)=I_d(\theta_Q,z)+I_s(\theta_Q,z)\quad \theta_{ij}\neq\theta_Q\quad \theta_Q\leqslant\theta \tag{8}$$

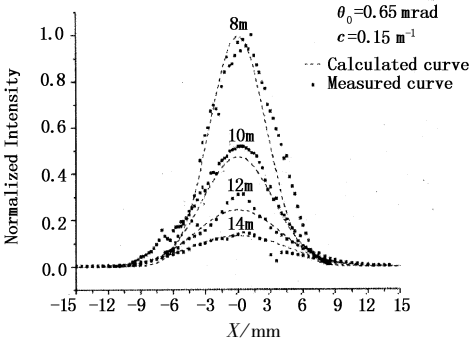
4 数值计算及实验验证

根据公式(6)、式(7)和式(8),分别计算了远场发散角为0.65 mrad的高斯光束在不同衰减系数水质中光强的径向分布规律。主要计算参数如下:激光波长 $\lambda=532$ nm;远场发散角 $\theta_0=0.65$ mrad;初始时高斯光束光斑的中心光强 $I_0(0,0)=1$;水体衰减系数 $c=0.1,0.15\ \mathrm{m}^{-1}$;单次散射率 $s/c=0.7$;传输距离 $z=8,10,12,14$ m;$N=500$,其归一化计算结果如图3中虚线所示,其中图3(a)的水体衰减系数为0.1,图3(b)的水体衰减系数为0.15。

在不同衰减系数的水体中进行实验测量,测得的归一化实验数据如图3中点线所示,其中图3(a)的水体衰减系数约为0.1,图3(b)的水体衰减系数约为0.15。



(a)水体衰减系数为0.1



(b)水体衰减系数为0.15

图3 不同水体中归一化光强的计算值与实测值的对比

从图3中可知:水下高斯光束远场光强的计算值和实验测量值存在较小的误差,两者基本上是一致的。图中误差产生的主要原因有三方面:①由于激光器和探测器的不稳定性、水体晃动、背景噪声等众多客观因素的影响,因此实验中会不可避免地有实验误差;②由于在实验中无法知道水体单次散射率的准确值,在理论计算时,均假定单次散射率为0.7,由此产生了计算误差;③本文的理论模型是建立在许多近似条件的基础上,因此计算值中存在理论误差。

5 结 论

本文以平行细光束水下传输的唯像模型为基础,推导了计算水下高斯光束远场光强分布的数学模型,分析了光强随水体衰减系数、传输距离、散射角的变化规律,并进行了实验验证。计算值和实验测量值基本吻合。计算和实验结果表明:

(1)高斯光束在水下不同传输距离处的光强径向分布仍然可以用高斯函数来描述;

(2)高斯光束在水下的光斑半径随传输距离的增大而增大,而且水体衰减系数越大,光斑半径扩展得越大;

(3)高斯光束在水下的光斑中心光强随传输距离的增大而减小,而且水体衰减系数越大,衰减得越快。

参考文献:

[1] Pan Shuguang, Deng Jiahao, Qiu Zhiliang. Characteristic analysis of detection of environment of underwater laser fuze[J]. Journal of Detection & Control, 2007, 29(1): 44-47. (in Chinese)

[2] Karl D Moore, Joles S Jaffe, Benjamin L Ochoa. Development of a new underwater bathymetric laser imaging system: L-Bath [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2000, 17: 1106-1117.

[3] Jules S Jaffe, Karl D Moore. Underwater optical imaging: status and prospects [J]. Oceanography, 2001, 14(3): 64-75.

[4] Huang Youwei, Jin Weiqi, Wang Xia, et al. Theoretical optical backscattering model for staring underwater laser imaging [J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(7): 1191-1197. (in Chinese)

[5] Deric Jon Gray. Monte Carlo solutions to the radiative transfer equation in ocean optics: Applications to instrument design and Mueller Matrix imaging [D]. United States: Texas A&M University, 2003.

[6] Liu Yingzhuang, Zhu Yaoting, Zhu Guangxi, et al. Study of underwater spot spread of collimated laser beam[J]. Chinese J. Lasers, 2001, 28(7): 617-620. (in Chinese)

[7] Paul F Schippnick. Phenomenological model of beam Spreading in ocean water [J]. Ocean Optics, 1990, 13(2): 13-37.

[8] Paul F Schippnick. Extension of model of beam spreading in seawater to include dependence on the scattering phase function[J]. Underwater Imaging Photography and Visibility, 1991, 15(37): 185-193.