

·信号与信息处理·

## 海水水质对激光接收功率的影响分析

李 晨<sup>1</sup>, 王 菲<sup>2</sup>

(1. 海军驻昆明地区军事代表室, 昆明 650032; 2. 西安邮电大学 电子工程学院, 西安 710121)

**摘 要:** 由于海水不同水域对激光信号的传输特性的影响不同, 根据不同海域海水水质参数, 分析蓝绿激光在海水光学信道中的衰减特性, 研究波长为 530 nm 激光时不同杂质浓度海水与信道衰减特性关系。利用蒙特卡洛方法模拟波长为 530 nm 激光在海水信道中的传输过程, 得到了不同杂质浓度对接收机接收功率影响的仿真图。同时利用高斯函数对仿真结果进行曲线拟合, 得到海水杂质浓度与接收机接收功率的关系模型, 从而可快速得到不同海水水质下, 任意接收位置的接收光功率, 以及不同浓度海水的衰减系数, 为以后水下激光通信接收系统的设计提供理论依据。

**关键词:** 海水杂质浓度; 水下光通信; 蒙特卡洛仿真; 高斯函数拟合

中图分类号: TN929.12

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2017)-01-0044-06

## Analysis of Seawater Impurity Concentration Effects on Receiver Power

LI Chen<sup>1</sup>, WANG Fei<sup>2</sup>

(1. Naval Representative office in Kunming, Kunming 650032, China;

2. School of Electronic Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710121, China)

**Abstract:** Because of the different water impurity effects on laser signal transmission characteristics, according to the impurity parameters of different seawater, the attenuation characteristics of blue-green laser in the optical channel of seawater are analyzed and the relationships between the different concentration and channel attenuation characteristics about the laser with a wavelength of 530 nm are studied. By using Monte Carlo method simulation, the transmission of laser with a wavelength of 530 nm in seawater channel is simulated, the simulation figures about different impurities concentration effect on received power are gotten. While fitting the simulation results by using Gaussian function, the relationship model of the concentration effects on the power of the receiver is obtained, so the power of any position in different seawater concentration can be achieved, and attenuation coefficient of different seawater concentration is gained, which can provide the theory evidence for underwater wireless laser communication.

**Key words:** seawater impurity concentration; underwater optical communication; Monte Carlo method simulation; Gaussian function fitting

海水是一个复杂的物理、化学、生物系统, 它含有溶解物、悬浮颗粒和各种各样的有机物质。海水的光衰减系数是水中的盐度、温度、有机溶解物、无机物、悬浮颗粒以及各种有机物的函数, 同时与光

波的波长有着密切关系<sup>[1]</sup>。在其他因素一定的情况下, 影响海水中光接收功率的主要是由海水的叶绿素散射、悬浮颗粒散射影响。目前以海水水分子、叶绿素和悬浮微粒对激光散射和吸收的特性为基

收稿日期: 2016-12-20

基金项目: 陕西省教育厅专项科研计划(15JK1681)

作者简介: 李晨(1977-), 男, 工程师, 主要从事水中兵器总体结构的研究; 王菲(1990-), 女, 硕士研究生, 主要从事光通信的研究。

础<sup>[2]</sup>,研究海水信道中光的传输模型及脉冲展宽特性较多,但是都未定量地分析不同杂质浓度的海水中光的衰减对接收机灵敏度的影响。

根据两种不同海域海水水质参数,通过蒙特卡洛模拟法分别仿真其对接收机接收功率的影响,利用高斯函数对仿真结果进行拟合,分析不同海域的海水对蓝绿激光传输功率的影响。

## 1 海水信道理论模型分析

### 1.1 海水信道的光学特性

海水的光学特性与纯海水、溶解物和悬浮体这三种因素有关。海水中的各种成分主要有两个重要的光学性质<sup>[4]</sup>,一是海水中各种成分对光的吸收作用,另一个是海水中各成分对光的散射作用。这两个光学特性会造成海水中光传输的衰减特性,因此海水总的衰减系数为海水吸收系数与散射系数之和。

海水的衰减特性与海水中所含物质的成分密切相关<sup>[5]</sup>。海水的衰减为海水中各种物质成分衰减系数之和。其中选定波长为 530 nm 激光时,海水中主要是叶绿素浮游植物和非色素悬浮粒子的浓度影响海水的衰减特性。

文中选取两种不同海域海水水质参数,即海水中所含浮游植物和非色素悬浮粒子的浓度不同。根据三类海水 Petzold 水文站测量的水质参数<sup>[6]</sup>,选取的浮游植物 chl 和非色素悬浮粒子 D 的浓度如表 1。

表 1 不同海域海水水质参数

海水类型	吸收系数/(m <sup>-1</sup> )	散射系数/(m <sup>-1</sup> )	衰减系数/(m <sup>-1</sup> )
远洋 chl=0.03 mg/m <sup>3</sup> D=0.01 mg/L	0.133 3	0.038 4	0.171 7
近海 chl=0.3 mg/m <sup>3</sup> D=0.8 mg/L	0.210 4	0.253 1	0.463 4

### 1.2 海水信道的蒙特卡洛仿真

根据光的粒子性,激光脉冲可以看成是由无数个光子束组成的,于是激光脉冲的传输问题就可以转换为光子的传输问题,蒙特卡洛法就是将激光看作一系列光子,然后逐个追踪各个光子的运动轨迹<sup>[9-10]</sup>,最后利用追踪到的光子的统计分布来表示激光的分布特征。

在整个蒙特卡洛模拟过程中,海水中粒子的分布式完全随机的,所以光子在这些介质中运动时,会与海水中的粒子发生随机碰撞。蒙特卡洛法解光子传输问题的一般过程包括:光子随机产生、光子随机迁移、光子碰撞过程、光子终止判断和数据统计处理。

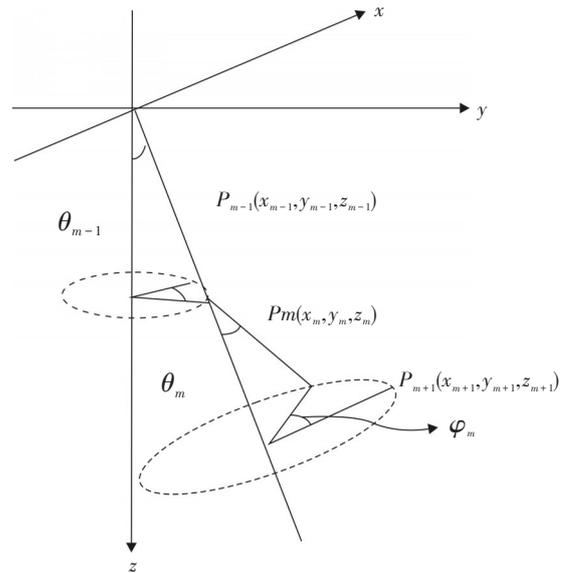


图 1 光子传输坐标系

图 1 为光子在海水介质中传输过程中的坐标系。

光子的初始位置为坐标原点,光子的初始运动方向为 Z 轴正向。光子的初始位置矢量  $r_m(x_m, y_m, z_m)$ , 方向矢量  $\Omega_m = (\mu_{xm}, \mu_{ym}, \mu_{zm})$ , 第  $m$  次碰撞后的光子运动方向相对于前一次碰撞的光子运动方向偏移用  $\theta_m$ 、 $\varphi_m$  来表示,其中  $\theta_m$  为散射角,  $\varphi_m$  为方位角。

#### (1) 光子的产生

模拟过程中激光器发射的光源看成是点光源,发射光功率为 -35 dBm,即光子数接近于  $10^6$  个。光子的位置用一个三维坐标  $(X, Y, Z)$  表示,光子的起始坐标为  $(0, 0, 0)$ , 初始方向  $\Omega_0 = (0, 0, 1)$ , 其中规定向下的方向为正。

#### (2) 光子的传输过程

光子传输一定距离(随机步长)  $d_m$  后,光子到达散射点。

$$d_m = -\frac{1}{c} \ln r_1 \quad (1)$$

式中,  $r_1$  是 $[0, 1]$ 间均匀分布随机数;  $c$  为海水中总的衰减系数。

(3) 下一个碰撞点位置

假设光子已经经历了  $m$  次碰撞作用, 下一个碰撞点为  $r_{m+1}$ 。则其下一个碰撞点的位置可以通过其随机步长  $d_m$  来确定, 即

$$\begin{cases} x_{m+1} = x_m + \mu_{xm} \cdot d_m \\ y_{m+1} = y_m + \mu_{ym} \cdot d_m \\ z_{m+1} = z_m + \mu_{zm} \cdot d_m \end{cases} \quad (2)$$

(4) 碰撞后的运动方向

散射发生后光子的散射方向  $(\varphi_m, \theta_m)$  可由下式决定<sup>[7]</sup>。

$$\begin{cases} \theta_m = \arccos\left\{\frac{1}{2g}\left[(1+g^2) - \frac{(1-g^2)}{(1-g+2gr_3)}\right]\right\} \\ \varphi_m = 2\pi r_2 \end{cases} \quad (3)$$

式中, 第  $m$  次碰撞后光子的运动方向相对于碰撞前光子的运动方向的散射角  $\theta_m$ , 方位角为  $\varphi_m$ , 前者通过对 H-G 函数抽样来获得, 后者则是在  $(0, 2\pi)$  上均匀分布函数的一个抽样值;  $r_2$ 、 $r_3$  各是 $[0, 1]$ 间均匀分布的随机数;  $G$  为非对称因子, 其中  $g$  为散射余弦的平均值,  $g = \langle \cos \theta \rangle = 0.924$ <sup>[3]</sup>。

通过坐标变换, 光子碰撞后新的方向矢量为<sup>[8]</sup>

$$\begin{cases} \mu_{xm+1} = \sin \theta_m (\mu_{xm} \mu_{zm} \cos \varphi_m - \mu_{ym} \sin \varphi_m) / \\ \quad \sqrt{1 - \mu_{zm}^2} + \mu_{xm} \cos \theta_m \\ \mu_{ym+1} = \sin \theta_m (\mu_{ym} \mu_{zm} \cos \varphi_m + \mu_{xm} \sin \varphi_m) / \\ \quad \sqrt{1 - \mu_{zm}^2} + \mu_{ym} \cos \theta_m \\ \mu_{zm+1} = -\sin \theta_m \cos \varphi_m \sqrt{1 - \mu_{zm}^2} + \mu_{zm} \cos \theta_m \end{cases} \quad (4)$$

如果光子的运动方向非常接近  $z$  轴, 则新的方向为

$$\begin{cases} \mu_{xm} = \sin \theta_m \cdot \sin \varphi_m \\ \mu_{ym} = \sin \theta_m \cdot \cos \varphi_m \\ \mu_{zm} = \cos \theta_m \end{cases} \quad (5)$$

(5) 碰撞后的权值

碰撞后的权值等于碰撞前的权值乘以介质的单次散射率  $\omega_0$ , 即

$$W_{m+1} = W_m \cdot \omega_0 \quad (6)$$

其中,  $\omega_0$  是海水中散射系数与总衰减系数的比值。

### 1.3 曲线拟合原理

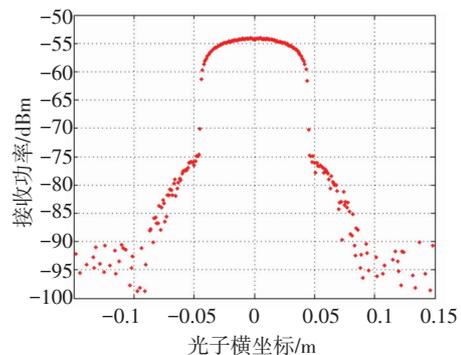
曲线拟合是用连续曲线近似地刻画或比拟平面上离散点组所表示的坐标之间的函数关系的一种数据处理方法, 是用解析表达式逼近离散数据的一种方法。通过实验得到的  $x$  与  $y$  的一组数据对  $(x_i, y_i)$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ ), 其中各  $x_i$  是彼此不同的。希望用一类与数据的背景材料规律相适应的解析表达式,  $y = f(x, b)$  来反映量  $x$  与  $y$  之间的依赖关系, 即在一定意义下最佳地逼近或拟合已知数据。  $f(x, b)$  常称作拟合模型, 式中  $b = (b_1, b_2, \dots, b_n)$  是一些待定参数。当  $b$  在  $f$  中线性出现时, 称为线性模型, 否则称为非线性模型。

参照蒙特卡洛模拟的数据模型, 选取最佳的高斯函数来拟合数据, 即利用使用形如  $y = a_i \cdot \exp(-(x - b_i)^2 / c_i^2)$  的高斯函数对数据进行函数逼近的拟合方法。

## 2 信道仿真及拟合结果分析

### 2.1 蒙特卡洛仿真结果

为了减少计算量, 文中发射端发射功率  $P_t = -51$  dBm。发散角  $\theta = 1.35$  mrad, 激光传输距离为 1 m, 选取不同水质参数, 其中远洋中叶绿素浓度  $chl = 0.03$  mg/m<sup>3</sup>, 非色素悬浮粒子浓度  $D = 0.01$  mg/L; 近海中叶绿素浓度为  $chl = 0.3$  mg/m<sup>3</sup>, 非色素悬浮粒子浓度  $D = 0.8$  mg/L; 以及全年平均海水中叶绿素浓度为  $chl = 5$  mg/m<sup>3</sup>, 非色素悬浮粒子浓度  $D = 1$  mg/L 时, 利用蒙特卡洛模拟法得到接收机接收功率与光斑位置的关系如图 2 所示。



(a) 远洋海水参数图

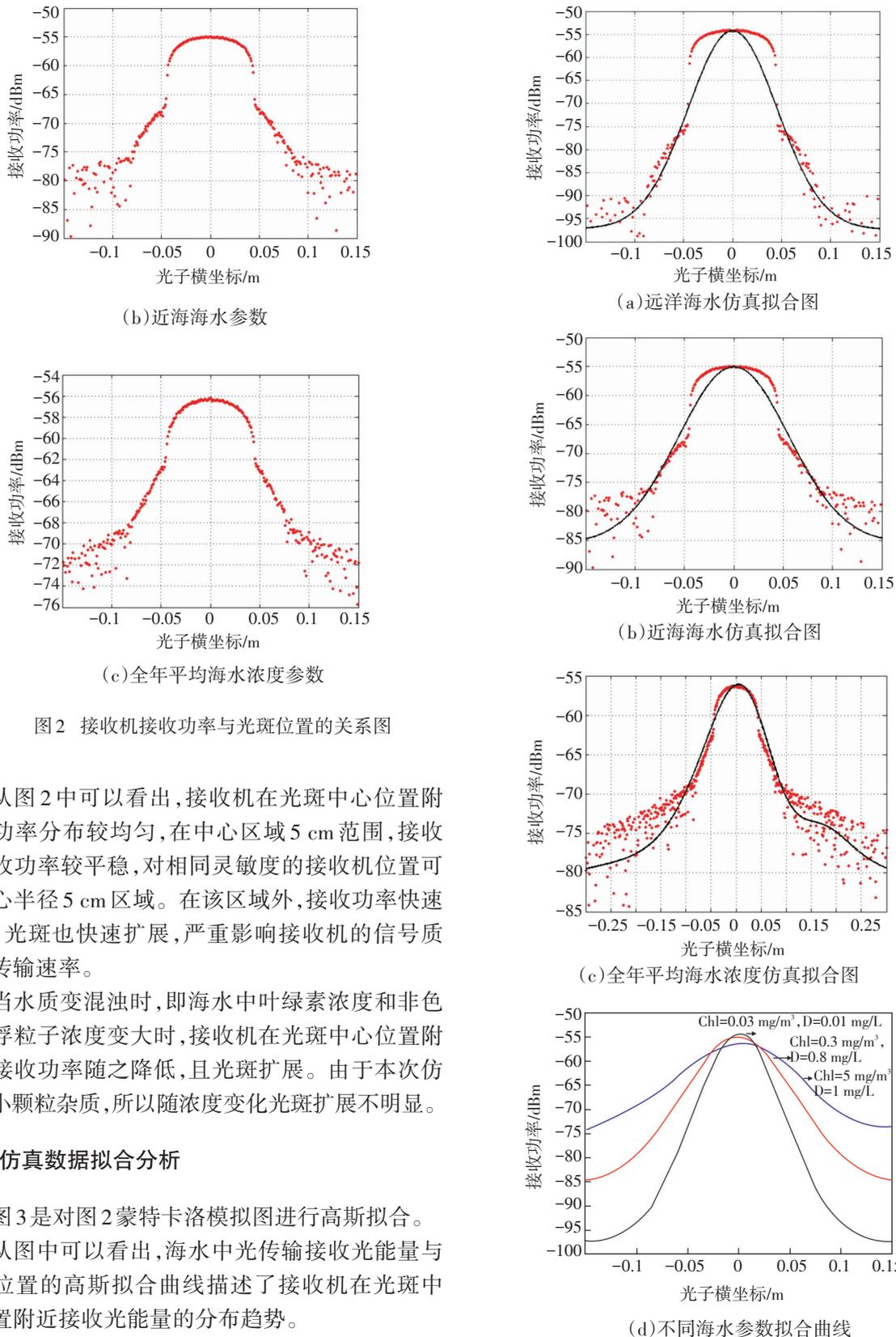


图2 接收机接收功率与光斑位置的关系图

从图2中可以看出,接收机在光斑中心位置附近光功率分布较均匀,在中心区域5 cm范围,接收机接收功率较平稳,对相同灵敏度的接收机位置可在中心半径5 cm区域。在该区域外,接收功率快速下降,光斑也快速扩展,严重影响接收机的信号质量和传输速率。

当水质变混浊时,即海水中叶绿素浓度和非色素悬浮粒子浓度变大时,接收机在光斑中心位置附近的接收功率随之降低,且光斑扩展。由于本次仿真是小颗粒杂质,所以随浓度变化光斑扩展不明显。

### 2.2 仿真数据拟合分析

图3是对图2蒙特卡洛模拟图进行高斯拟合。

从图中可以看出,海水中光传输接收光能量与光斑位置的高斯拟合曲线描述了接收机在光斑中心位置附近接收光能量的分布趋势。

图3 海水中光传输接收光功率与光斑位置拟合曲线

式(7)为海水中光传输接收光功率与光斑位置的高斯拟合曲线,其中 $y$ 表示纵坐标的接收功率; $x$ 表示横坐标的光斑位置。

$$y = a1 \cdot \exp(-((x - b1)/c1)^2) + a2 \cdot \exp(-((x - b2)/c2)^2) + a3 \cdot \exp(-((x - b3)/c3)^2) \quad (7)$$

## 2.3 拟合数据分析

表2为高斯拟合曲线系数。表3为不同海域,不同光斑半径,利用高斯函数拟合曲线计算的方差。

表2 高斯拟合曲线系数

系数	$a1$	$b1$	$c1$	$a2$	$b2$	$c2$	$a3$	$b3$	$c3$
远洋	8.52	-0.010 2	2.179	42.97	-7.164e-06	0.064 56	-186.3	249.5	331.5
近海	-716.3	22.48	13.73	30.7	7.213e-05	0.078 1	-3.702e+15	-193.1	34

表3 不同海域,不同光斑半径,利用高斯函数拟合曲线计算的方差

(a) 光斑半径<2 cm时,不同海域方差

海水类型	远洋 chl=0.03 mg/m <sup>3</sup> D=0.01 mg/L	近海 chl=0.3 mg/m <sup>3</sup> D=0.8 mg/L	平均浓度 chl=5mg/m <sup>3</sup> D=1 mg/L
方差	1.623 8	0.387 1	0.031 6

(b) 光斑半径>=2 cm时,不同海域方差

海水类型	远洋 chl=0.03 mg/m <sup>3</sup> D=0.01 mg/L	近海 chl=0.3 mg/m <sup>3</sup> D=0.8 mg/L	平均浓度 chl=5 mg/m <sup>3</sup> D=1 mg/L
方差	84.66	69.67	68.277 2

从表3中可以看出,采用高斯拟合,在中心区域,杂质浓度较小的海水拟合误差较小。所以当在远洋海水的水质条件下,根据接收机所在位置 $x$ ,利用高斯拟合曲线图3c计算出的接收机接收功率 $y$ 。

并且从中可以得到远洋海水的海水衰减系数在3 dB/m左右。表4是由高斯拟合数据得到的任意位置接收功率。

表4 由高斯拟合数据得到的任意位置接收功率

$x/m$	-0.012	-0.008	-0.000 1	0.01	0.015	0.02
$y/dBm$	-55.492 1	-54.690 1	-54.250 2	-55.066	-56.024	-57.618 7

由表4可以看出,利用高斯拟合曲线可以更快速的得出接收机的接收功率,比利用蒙特卡洛模拟法更简单方便,为以后计算水下激光通信接收系统的传输距离提供依据。

## 3 结论

由于蒙特卡洛模拟法仿真水下光传输接收的光功率与光斑位置时,需要大量的光子数模拟激光束在海水中的散射特性,仿真时间很长,并且仿真出的海水中光传输接收的光功率与光斑位置是离散点,无法得到任意位置的接收光功率。通过利用高斯函数对其拟合,接收机可以在一定范围内得到任意光斑位置的接收功率。

通过计算530 nm的激光在远洋海水、近海海水

以及全年平均海水杂质浓度时的传输特性,采用蒙特卡洛仿真方法模拟激光的光子在海水中的传输过程,并对仿真结果进行了高斯拟合。从仿真结果和拟合结果可以看出,激光在海水中传输时,光斑扩展在一定的范围内是均匀的,接收机根据灵敏度可在该区域中的任意位置放置。而海水杂质浓度变高之后,信号的衰减不是很明显,因为光在海水中的衰减主要是纯海水对光的吸收造成的。远洋海水的蓝绿激光衰减系数大约在3 dB/m左右。

## 参考文献

- [1] 隋美红. 水下光学无线通信系统的关键技术研究[D]. 青岛:中国海洋大学,2009.
- [2] Hickman G D, Harding J M, Carnes M. Aircraft laser sens-

ing of sound velocity in water: Brillouin scattering[J]. Remote sens. Environ, 1991, 36:165-178.

- [3] Mobley C D. Light and water: radiative transfer in natural waters[J]. Academic Press, 1994.
- [4] 阎旭光. 基于蒙特卡罗模拟的海水光信道特性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2004.
- [5] Raymond C Smith, Karen S Baker. Optical properties of the clearest natural waters [J]. Applied Optics, 1981, 20 (2):177-184
- [6] Werner C, Streicher J, Herrmann H, et al. Multiple-scattering lidar experiments[J]. Optical Engineering, 1992, 31: 1731-1745.

- [7] 王文朋. 水下激光通信系统中信道特性分析[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
- [8] Arindam Banerjee, Anil A Ogale, Kunal Mitra. Experimental simulate on of lightning optical emissions in clouds [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2006, 39: 575-583.
- [9] Yuri I Kopilevich, Victor I Feygels, Alexey Surkov. Mathematical modeling of input signals for oceanographic lidar systems[J]. SPIE, 2003, 5155:30-39.
- [10] Eugeny P Savchenko, Valery V Tuchin. Computer simulation of light propagation in a multi-layer biological by Monte-Carlo method[J]. SPIE, 2000:317-326.

(上接第9页)

而且纵向视场角增长幅度比横向视场角大,同时系统的均匀性降低。当比值大于6时,横向视场角不超过 $1^\circ$ ,纵向视场角不超过 $2.6^\circ$ ,且均匀性大于0.75。

## 5 结论

分步法通过分步设计光学曲面分别完成横纵向视场角的控制,可以实现LED矩形均匀照明,同时实现较小横向视场角光束,但是纵向视场角仍然大于 $120^\circ$ 。文中设计新的光学曲面控制纵向视场角,可同时实现横纵向小视场角矩形均匀照明。通过设计第一光学曲面将球面波整形为柱面波,通过设计第二光学曲面将部分柱面波准直,通过设计第三光学曲面将其余柱面波准直,根据设计的光学曲面构造折射透镜和紧邻的反射器组成光学系统。光线追迹结果表明,当光源距透镜内曲面尺寸与光源尺寸的比值增大,整形后光束的横纵向视场角增大,同时系统的均匀性降低。当比值大于6时,横向视场角不超过 $1^\circ$ ,纵向视场角不超过 $2.6^\circ$ ,且均匀性大于0.75。该方法可以有效应用于舰船基于颜色/频率的光学对中系统。

## 参考文献

- [1] Schruben J S. Formulation of a reflector-design problem for a lighting fixture[J]. J Opt Soc Am, 1972, 62(12):1498-1501.
- [2] Olikier V, Newman E, Prussner L. Formula for computing illumination intensity in a mirror optical system[J]. J Opt-

Soc Am A, 1993, 10(9):1895-1901.

- [3] Olikier V, Newman E. The energy conservation equation in the reflector mapping problem[J]. Applied mathematics letters, 1993, 6(1):91-95.
- [4] Wang K, Liu S, Chen F, et al. Freeform LED lens for rectangularly prescribed illumination[J]. Journal of Optics A: Pure and Applied Optics, 2009, 11(8):105501.
- [5] Liu D, Zhang X, Chen C. Free-form lens for rectangular illumination with the target plane rotating at a certain angle[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2015, 32(11):1958-63.
- [6] Ma D, Feng Z, Liang R. Tailoring freeform illumination optics in a double-pole coordinate system[J]. Appl Optics, 2015, 54(9), 2395-2399.
- [7] Michaelis D, Schreiber P, Bräuer A. Cartesian oval representation of freeform optics in illumination systems[J]. Optics letters, 2011, 36(6):918-920.
- [8] Miñano J C, Benítez P, González J C. RX:an imaging concentrator[J]. Applied Optics, 1995, 34(13):2226-2235.
- [9] 陈琛, 张晓晖, 刘典宏. LED均匀准直光学系统设计[J]. 海军工程大学学报, 2015, 27(04):103-107.
- [10] 程治明, 曾平, 张志海, 等. 与LED发光面平行平面上多向准直光束的研究[J]. 光学学报, 2014, 34(10):71-76.
- [11] Luo Y, Feng Z, Han Y, et al. Design of compact and smooth free-form optical system with uniform illuminance for LED source[J]. Opt. Express, 2010, 18(9):9055-9063.
- [12] Ma D, Feng Z, Liang R. Freeform illumination lens design using composite ray mapping[J]. Appl Optics, 2015, 54(3): 498-503.
- [13] Liu Z, Yu F. Non-uniform grid target tessellation method for the design of lens group with rectangular uniform illumination [J]. Appl Optics, 2015, 54(7):1618-1624.