

引用格式: LI Cong, YUAN Ruiman, GAO Hong, et al. Characteristics of Blue-green Laser Downlink Cross-media Transmission under Different Weather Conditions[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(12):1201003

李聪,袁瑞蔓,高洪,等.不同天气条件下蓝绿激光下行跨介质传输特性[J].光子学报,2021,50(12):1201003

# 不同天气条件下蓝绿激光下行跨介质传输特性

李聪<sup>1</sup>,袁瑞蔓<sup>2</sup>,高洪<sup>2</sup>,张亭禄<sup>2</sup>,孙博<sup>1</sup>,陈特<sup>1</sup>,曹桂兴<sup>1</sup>

(1 中国空间技术研究院 通信与导航卫星总体部,北京 100094)

(2 中国海洋大学 海洋技术系,山东 青岛 266100)

**摘 要:**采用蒙特卡洛仿真方法,分析了三种典型天气条件(晴天、层云和卷云)下激光在大气-海气界面-水体中的下行传输特性。结果表明:不同天气条件下经过大气传输到达海面的激光角分布明显不同,晴天时角分布发散很小,层云条件下发散严重,卷云条件下发散明显;晴天与层云条件下到达海面的光斑尺寸接近,而卷云条件下光斑大 15% 左右。不同天气条件下,激光经过大气、海气界面后角分布表现出不同的特征,晴天时海面使激光角分布发散变大,且随风速的增加发散呈变大的趋势;层云条件下海面使角分布发散变小,且随风速的增加发散呈变小的趋势;卷云条件下激光角分布变化复杂。不同天气条件下,激光经过大气、海气界面、水体后,既有相同特征又有不同之处。当水较浅时,三种天气条件下角分布表现出不同特征,水较深时角分布趋于一致;晴天和层云条件下的光斑尺寸基本不随水深变化,卷云条件下随深度增加明显减小。不同天气条件下光斑中心能量随深度的变化存在一定差异,晴天时平均变化率约为 -0.410 dB/m,层云和卷云条件下分别为 -0.426 dB/m 和 -0.413 dB/m。研究结果可为蓝绿激光跨介质通信链路预算、系统设计及参数优化提供参考。

**关键词:**水下通信;信道传输特性;蒙特卡洛;天气影响;激光

中图分类号:P733.3;N32

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20215012.1201003

## Characteristics of Blue-green Laser Downlink Cross-media Transmission under Different Weather Conditions

LI Cong<sup>1</sup>, YUAN Ruiman<sup>2</sup>, GAO Hong<sup>2</sup>, ZHANG Tinglu<sup>2</sup>, SUN Bo<sup>1</sup>, CHEN Te<sup>1</sup>,  
CAO Guixing<sup>1</sup>

(1 Institute of Telecommunication and Navigation Satellites, China Academy of Space Technology,  
Beijing 100094, China)

(2 Department of Marine Technology, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100, China)

**Abstract:** The characteristics of laser downlink cross-media transmission through atmosphere, rough sea surface and seawater under three typical weather conditions (clear day, stratus and cirrus) are analyzed by using Monte Carlo simulation method. The results show that, the angular distributions of the light propagating through atmosphere are different under different weather conditions. The divergence is small under clear day condition, which is serious under stratus condition and obvious under cirrus condition. The difference between the spot sizes under clear day and stratus conditions is small, while the size under cirrus condition is about 15% larger. The laser shows different characteristics propagating through atmosphere and sea surface under different weather conditions. The angular divergence is larger and increases with wind

基金项目:国家自然科学基金(Nos. 61675232, 61975234)

第一作者:李聪(1982—),女,高级工程师,博士,主要研究方向为空间光通信。Email: liccast@163.com

通讯作者:张亭禄(1965—),男,教授,博士,主要研究方向为海洋光学及光学遥感。Email: zhangtl@ouc.edu.cn

收稿日期:2021-05-06;录用日期:2021-08-10

<http://www.photon.ac.cn>

speed under clear day condition. It is smaller and decreases with wind speed under stratus condition. The angular divergence changes complicatedly under cirrus condition. Under different weather conditions, there are similar characteristics of light propagating through atmosphere-surface-sea as well as differences. The characteristics of the angular distributions are different in shallow water, while similar in deep water. The spot size changes little with water depth under clear day and stratus conditions, while it decreases as the depth increases under cirrus condition. In addition, the spot center energy attenuation with depth is different under different weather conditions. Under clear day condition the average rate of change is about  $-0.410$  dB/m, while under stratus and cirrus conditions about  $-0.426$  dB/m and  $-0.413$  dB/m respectively. The results could offer a reference for blue-green laser cross-media communication link budget, system design and parameter optimization.

**Key words:** Underwater communication; Channel transmission characteristics; Monte Carlo; Weather effects; Laser

**OCIS Codes:** 010.1110; 010.1615; 200.4960; 290.4210

## 0 引言

海洋激光探测及通信应用中,激光需要跨越大气、海气界面以及水体信道,不同信道对激光传输的影响各不相同,且时空变化复杂。大气信道包含大气分子、气溶胶、云、雾、雨及雪等,这些因素对光传输的影响差异很大。海面随风随机起伏,激光在界面的反射及折射情况复杂多变。水体信道中影响光传输的因素很多,主要包括水分子、可溶有机物、生物颗粒物以及非生物颗粒物等。激光在大气信道中向下传输时,不同天气条件下,由于介质的吸收和散射性质不同<sup>[1-4]</sup>,到达海面的激光特性(如角分布、光斑分布等)会有显著差异。激光在海气界面及水体中传输时,传输特性除了与海况和水体光学性质相关外,还与入射光场的特性有关<sup>[5-6]</sup>。目前国内外已开展了大量关于激光在不同信道中传输特性的研究,包括激光在海洋水体中传输特性的研究<sup>[7-10]</sup>、在大气中传输特性的研究<sup>[11-14]</sup>以及在海气界面传输特性的研究<sup>[15-17]</sup>,但这些研究大多是针对单一信道进行的,关于激光跨越不同介质传输特性的研究<sup>[18]</sup>较少。本文将采用蒙特卡洛仿真方法<sup>[19-23]</sup>,针对晴天、层云和卷云三种典型天气条件,分析激光在大气-海气界面-水体信道中的下行跨介质传输特性。

## 1 信道光学性质

对于激光跨越大气-海气界面-水体下行传输,首先介绍大气、海气界面、水体信道的光学性质,考虑到海水对450~580 nm波长范围内的蓝绿光衰减较小,研究将主要针对该波段进行。

### 1.1 大气光学性质

大气信道中影响激光传输的主要因素包括大气分子的吸收和散射、气溶胶的吸收和散射以及云的散射等。

#### 1.1.1 大气分子吸收及散射

在大气中,起主要吸收作用的分子有 $H_2O$ 、 $CO_2$ 、 $O_3$ 和 $O_2$ 。大气中分子的吸收具有显著的波长依赖性,在蓝绿光波段内,大气分子对激光的吸收较弱。大气分子的散射属于瑞利散射,其散射系数与波长的四次方呈反比。

大气分子散射相函数计算公式为<sup>[1]</sup>

$$P(\theta) = \frac{3}{4}(1 + \cos^2\theta) \quad (1)$$

式中, $\theta$ 为散射角。

#### 1.1.2 气溶胶吸收及散射

大洋上空的气溶胶可分为3层<sup>[2]</sup>:0~2 km海洋型气溶胶,2~12 km大陆型气溶胶和12~50 km硫酸盐型气溶胶。不同类型的气溶胶具有不同的吸收和散射性质,表1为532 nm波长处大气气溶胶的垂直分布及光学性质。

海洋上大陆型气溶胶和硫酸盐型气溶胶的构成和含量相对稳定,其粒径分布和折射率已知,可以利用米散射理论计算其散射相函数。大陆型气溶胶由沙尘性(dust-like)、水溶性(water-soluble)和煤烟性(soot)

表 1 大气气溶胶的垂直分布及光学性质(波长 532 nm)

**Table 1 Vertical distribution and optical properties of atmospheric aerosols with wavelength of 532 nm**

Height	Aerosol type	Attenuation coefficient/m <sup>-1</sup>	Single scattering probability
0~2 km, boundary layer	Maritime	1.3×10 <sup>-4</sup>	1.00
2~12 km, troposphere	Continental	5.0×10 <sup>-6</sup>	0.86
12~50 km, stratosphere	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	1.3×10 <sup>-7</sup>	1.00

三种基本颗粒物按一定的比例组成,颗粒物的粒径分布均遵从对数正态分布<sup>[2]</sup>,折射率如表 2 所示<sup>[2]</sup>。

表 2 大陆型气溶胶不同组分折射率

**Table 2 Refractive indices of different components of continental aerosol**

Wavelength/nm	Dust-like	Water-soluble	Soot
532	1.530-8.00×10 <sup>-3</sup> i	1.530-6.00×10 <sup>-3</sup> i	1.750-0.450i

海洋上硫酸盐型气溶胶的折射率为 1.431-1.00×10<sup>-8</sup>i(波长 532 nm),粒径分布为修正的伽马分布<sup>[2]</sup>。

海洋型气溶胶的散射是空气中相对湿度的函数<sup>[3]</sup>,以大气湿度 80% 为例,对应的海洋型气溶胶散射相函数如图 1 中红线所示。

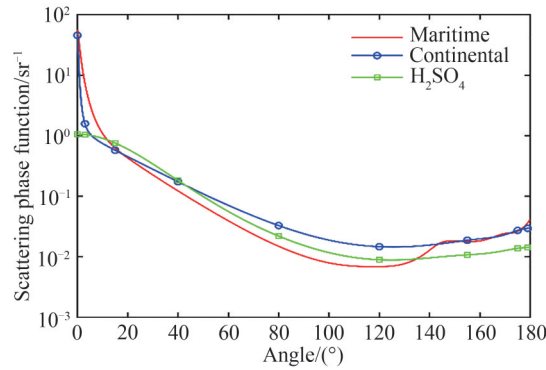


图 1 不同类型气溶胶散射相函数

Fig. 1 Scattering phase functions of different types of aerosol

### 1.1.3 云的散射

云的种类和结构十分复杂,但从其微物理特性看,主要分为水云和冰云,水云由水滴构成,冰云由冰晶构成。以水云和冰云的典型代表层云和卷云为例,分析它们对激光传输的影响。层云和卷云的光学性质可

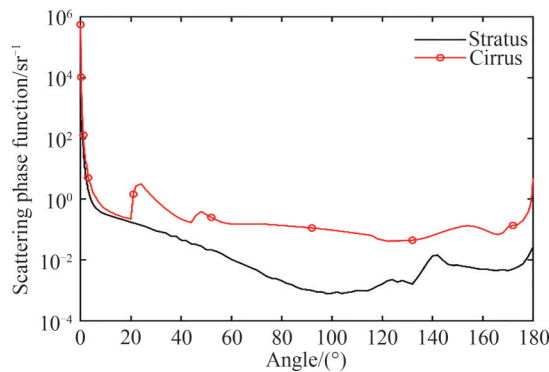


图 2 层云和卷云的散射相函数

Fig. 2 Scattering phase functions of two typical clouds

根据其微物理特性由米散射理论计算得到<sup>[4]</sup>,如图2和表3所示。由图2可以看出,层云和卷云的散射相函数存在明显差异。

表3 云垂向分布及光学性质(波长 532 nm)  
Table 3 Vertical distribution and optical properties of clouds with wavelength of 532 nm

Type	Cloud base height/m	Thickness/m	Attenuation coefficient/m <sup>-1</sup>	Single scattering probability	Visibility/m
Stratus (maritime)	1 000	300	$4.18 \times 10^{-2}$	1	70
Cirrus	6 000	800	$6.62 \times 10^{-3}$	1	4 000

## 1.2 水体光学性质

海水中影响光传输的因素主要包括纯海水、颗粒物、黄色物质(可溶有机物)以及湍流等,它们的吸收和散射特性决定了光在海水中的传输特性。本文重点研究纯海水、颗粒物和黄色物质的光学性质,后续研究还将考虑湍流对激光传输的影响。

海水的总吸收系数  $a$  和总散射系数  $b$  分别为各组分吸收和散射系数之和,即

$$a(\lambda) = a_w(\lambda) + a_p(\lambda) + a_g(\lambda) \quad (2)$$

$$b(\lambda) = b_w(\lambda) + b_p(\lambda) \quad (3)$$

式中,  $a_w(\lambda)$  是纯海水的吸收系数,  $a_p(\lambda)$  为颗粒物的吸收系数,  $a_g(\lambda)$  是黄色物质的吸收系数;  $b_w(\lambda)$  是纯海水的散射系数,  $b_p(\lambda)$  为颗粒物的散射系数。

### 1.2.1 纯海水的光学性质

由于纯海水组分固定,主要包括纯水和无机盐,在蓝绿光范围内,无机盐对光吸收的影响很小,因此纯海水的吸收通常用纯水吸收近似。纯水的吸收系数采用 POPE R M 和 FRY E S 的测量结果<sup>[24]</sup>,如图3所示。

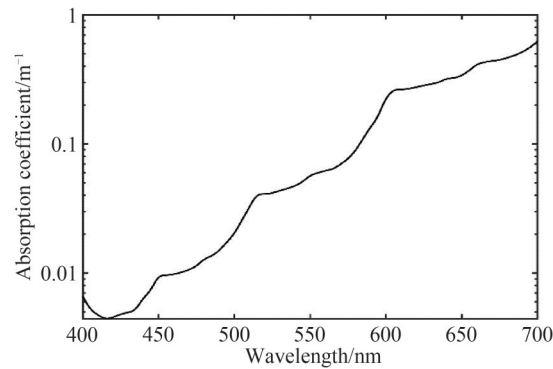


图3 纯水吸收系数

Fig. 3 Absorption coefficient of pure water

纯海水的散射系数采用如下模型<sup>[25]</sup>

$$b_w(\lambda) = 0.0019 \left( \frac{\lambda}{550} \right)^{-4.3} \quad (4)$$

### 1.2.2 颗粒物的光学性质

颗粒物的吸收系数计算公式为<sup>[26]</sup>

$$a_p(\lambda) = A_p(\lambda) C^{E_p(\lambda)} \quad (5)$$

式中,  $A_p(\lambda)$  和  $E_p(\lambda)$  是与波长相关的统计回归常数,  $C$  为叶绿素浓度(单位  $\text{mg}/\text{m}^3$ )。

颗粒物的散射系数模型计算公式为<sup>[27]</sup>

$$b_p(\lambda) = 0.416C^{0.766} \left( \frac{550}{\lambda} \right) \quad (6)$$

水体的散射相函数采用清洁水体测量的结果(包括颗粒物和纯海水)<sup>[28]</sup>,如图4所示。

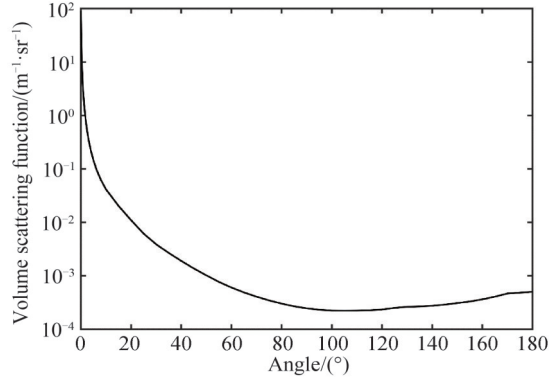


图4 大洋清洁海水的体散射函数

Fig. 4 Volume scattering function of clean ocean water

### 1.2.3 黄色物质的光学性质

黄色物质的吸收系数计算公式为<sup>[29]</sup>

$$a_g(\lambda) = a_g(\lambda_0) \exp \left[ -S_g(\lambda - \lambda_0) \right] \quad (7)$$

式中, $\lambda_0$ 为参考波长, $a_g(\lambda_0)$ 为参考波长 $\lambda_0$ 处黄色物质的吸收系数(单位 $\text{m}^{-1}$ ),常数项 $S_g$ 与水域水质有关,全球平均值约为 $0.014 \text{ nm}^{-1}$ 。

对于黄色物质吸收系数,通常选取440 nm作为参考波长。对于大洋水体, $a_g(440)$ 与浮游植物含量具有相关性,其关系可表示为<sup>[27]</sup>

$$a_g(440) = 0.2 \left[ a_w(440) + 0.06C^{0.65} \right] \quad (8)$$

式中, $a_w(440)$ 为纯水在波长440 nm处的吸收系数。

黄色物质是溶解有机物,其散射可忽略。

根据以上分析,已知叶绿素浓度及激光波长,可得到水体的吸收和散射系数。

### 1.3 海气界面的光学性质

海水和大气介质的折射率不同,激光在海气界面传输时会发生反射和折射。根据反射和折射定律可以容易地描述出光在理想水平海面的传输过程。

根据菲涅尔反射定律,垂直偏振光和平行偏振光在海气界面的反射率分别表示为

$$\rho_{\perp} = \frac{\sin^2(\theta_i - \theta_t)}{\sin^2(\theta_i + \theta_t)} \quad (9)$$

$$\rho_{\parallel} = \frac{\tan^2(\theta_i - \theta_t)}{\tan^2(\theta_i + \theta_t)} \quad (10)$$

式中, $\theta_i$ 和 $\theta_t$ 分别是光的入射角和折射角。

非偏振光的反射率表示为

$$\rho = \frac{1}{2}(\rho_{\perp} + \rho_{\parallel}) = \frac{1}{2} \left[ \frac{\sin^2(\theta_i - \theta_t)}{\sin^2(\theta_i + \theta_t)} + \frac{\tan^2(\theta_i - \theta_t)}{\tan^2(\theta_i + \theta_t)} \right] \quad (11)$$

因此,通过式(11)可以计算出非偏振光在理想水平海面的反射率。

光在海气界面发生折射时,入射角和折射角之间的关系遵循斯涅尔折射定律

$$n_a \sin \theta_a = n_w \sin \theta_w \quad (12)$$

式中, $n_a$ 和 $n_w$ 分别为空气和海水的折射率。假定光在空气中折射率 $n_a=1$ ,则

$$\sin \theta_a = n_w \sin \theta_w \quad (13)$$

根据式(13)可以计算出光通过理想水平海面的折射角。

在现实环境中,海面是随机起伏的粗糙面,并不是一个水平面。为了研究方便,粗糙海面可近似为很多具有不同斜率的小波面,每个小波面上的辐射传输遵循菲涅尔反射定律和斯涅尔折射定律。如果已知各个小波面方向的概率分布,把单个小波面的贡献综合起来就可以获得整个粗糙海面的传输特性。

小波面的斜率与风速相关,粗糙海面斜率的概率密度分布采用Cox-Munk模型<sup>[30]</sup>。已知海面的斜率,可以计算出不同方向的入射光相对海面法线方向的夹角,即入射角,从而求出折射角、反射率和透过率。

## 2 蒙特卡洛仿真方法

依据大气/海洋辐射传输理论,已知大气及海洋的固有光学性质及其边界条件,可由辐射传输方程得到信道中任意一处的光场分布<sup>[31]</sup>,即

$$\frac{dL(r, \theta, \varphi, \lambda)}{dr} = -c(r, \lambda)L(r, \theta, \varphi, \lambda) + \int_{4\pi} \beta(r, \theta, \varphi, \theta', \varphi', \lambda)L(r, \theta', \varphi', \lambda) \sin \theta' d\theta' d\varphi' + S(r, \theta, \varphi, \lambda) \quad (14)$$

式中, $L(r, \theta, \varphi, \lambda)$ 是波长 $\lambda$ 、方向 $(\theta, \varphi)$ 上的辐亮度, $\theta$ 是光子传输方向与天顶方向的夹角, $\varphi$ 是方位角, $r$ 是传输距离, $c$ 是衰减系数, $\beta$ 是体散射函数, $S$ 包括水中非弹性散射对辐亮度的贡献。

式(14)实质上是一个微-积分方程,由于体散射函数 $\beta$ 非常复杂,且通过积分与辐亮度 $L$ 耦合,难以解析求解,因此常采用数值方法求解。

蒙特卡洛(Monte Carlo)模拟是一种广泛采用的数值求解方法,特别适合模拟激光在介质中的传输,应用领域包括水下激光通信、激光雷达等<sup>[10,12,15,18,22-23]</sup>。本文目标是基于“光子追踪”技术获取水下光场分布,即接收器上光场的概率分布函数,采用该方法可实现从光源到接收器的光子追踪。主要思路为:根据光子路径长度、相互作用类型、散射方向以及起伏海面斜率等已知概率分布计算光子轨迹,统计到达接收面的光子轨迹,从而获得相应的光场信息。

### 2.1 光子路径长度

确定已知传输方向的光子与介质发生相互作用前的传输距离。辐亮度为 $L(x, \xi_1)$ 的准直光束随距离衰减的规律为

$$L(r, \xi_1) = L(0, \xi_1) \cdot e^{-cr} \quad (15)$$

式中, $r$ 为 $\xi_1$ 方向上光子传输的几何距离,参考点 $x_0$ 对应的 $r$ 为0。

平均自由程 $1/c$ 为两次相互作用(吸收或散射)之间光子传输的平均距离,因此,一个光子在长度 $dr$ 内发生相互作用的概率为 $c \cdot dr$ ,不发生相互作用的概率为 $1 - c \cdot dr$ 。如果把长度为 $r$ 的路径等分成 $N$ 段,传输距离 $r$ 内不发生相互作用的概率为

$$P(r) = \left(1 - \frac{cr}{N}\right)^N = e^{-cr} = e^{-\tau} \quad (16)$$

式中,光学路径长度 $\tau = cr$ ,光学路径 $\tau$ 内相互作用发生的概率,即累积概率分布为

$$P(\tau) = 1 - e^{-\tau} \quad (17)$$

从累积分布 $\Psi(\tau)$ 中抽样基于如下基本规则

$$\zeta = \int_a^\tau p_d(\tau') d\tau' = \Psi(\tau) \quad (18)$$

式中, $\zeta$ 为在 $0 \sim 1$ 之间均分布的随机数, $a$ 为 $\tau$ 的最小值, $\tau$ 为抽样参数, $p_d$ 为概率密度分布函数。

光学路径长度抽样为

$$\tau = -\ln(1 - \zeta) \quad (19)$$

由于 $1 - \zeta$ 也是在 $0 \sim 1$ 之间均分布的随机数,因此,式(19)也可写为

$$\tau = -\ln(\zeta) \quad (20)$$

如果 $r$ 为几何路径长度,则

$$r = \frac{\tau}{c} = -\frac{\ln(\zeta)}{c} \quad (21)$$

## 2.2 光子相互作用类型

利用上述随机数方法对光子传输距离  $r$  进行抽样后,用同样的方法判断光子与水体介质相互作用类型是吸收还是散射。首先产生在  $0\sim 1$  内均匀分布的随机数  $\zeta$ ,然后与单次散射几率( $\omega_0 = \frac{b}{c}$ )进行比较。如果  $\zeta > \omega_0$ ,则认定为吸收事件;如果  $\zeta \leq \omega_0$ ,则认定为散射事件,因此  $\omega_0$  也可以被称为光子的生存率。为了提高运算效率,采用光子包的方法判断光子相互作用类型。假定开始时光子的权重  $w_0 = 1$ ,光子每次与水体相互作用后,权重变为  $w_0 \cdot \frac{b}{c}$ ,设定当光子权重小于阈值后,中断对该光子的追踪。

## 2.3 散射方向

光子介质相互作用后,根据散射相函数  $\tilde{\beta}$  随机决定光子的新方向。 $\tilde{\beta}(\xi' \rightarrow \xi)$  为光子由  $\xi'$  方向散射到  $\xi$  方向的概率密度函数,因此,散射到以  $\xi$  为中心的单位立体角  $d\Omega(\xi)$  内的概率密度为

$$\tilde{\beta}(\xi' \rightarrow \xi) d\Omega(\xi) = \tilde{\beta}(\theta, \varphi) \sin \theta d\theta d\varphi \quad (22)$$

式中,  $\theta$  和  $\varphi$  分别为在以入射方向  $\xi'$  为中心的坐标系中光子的散射角和方位角。

在自然水体中,  $\tilde{\beta}$  仅依赖于散射角,因此,  $\tilde{\beta}(\theta, \varphi) = \tilde{\beta}(\theta)$ 。  $\theta$  和  $\varphi$  是相互独立的随机量,可以通过两个随机数分别进行抽样,联合概率密度函数为

$$\tilde{\beta}(\theta, \varphi) \sin \theta d\theta d\varphi = p_\theta(\theta) d\theta \cdot p_\varphi(\varphi) d\varphi \quad (23)$$

方位角  $\varphi$  在  $0\sim 2\pi$  范围内均匀分布,因此,  $\varphi$  对应的概率密度函数为

$$p_\varphi(\varphi) d\varphi = (1/2\pi) d\varphi \quad (24)$$

$\theta$  对应的概率密度函数为

$$p_\theta(\theta) = 2\pi \tilde{\beta}(\theta) \sin \theta \quad (25)$$

为了决定散射角  $\theta$ ,产生在  $0\sim 1$  之间均匀分布的随机数  $\zeta$ ,并设定

$$\zeta = p_\theta(\theta) = \int_0^\theta p_\theta(\theta') d\theta' = 2\pi \int_0^\theta \tilde{\beta}(\theta') \sin \theta' d\theta' \quad (26)$$

由于  $\tilde{\beta}(\theta)$  形状很复杂,通常为了确定与  $\zeta$  对应的  $\theta$ ,需随式(26)进行数值求解。

$\varphi$  随机抽样为

$$\varphi = 2\pi\zeta \quad (27)$$

式中,  $\zeta$  为在  $0\sim 1$  之间均匀分布的另一随机数。

## 2.4 随机起伏界面斜率

与入射光子发生相互作用的小波面斜率不同,因此需要修正光子的入射方向,以判断光子与界面发生相互作用后的方向。

$\theta_n$  和  $\varphi_n$  分别是小波面法线的极角和方位角,  $\theta_n$  的累积分布函数为<sup>[30]</sup>

$$P(\theta_n) = 1 - \exp\left(-\frac{\tan^2 \theta_n}{2\sigma^2}\right) \quad (28)$$

$$\sigma^2 = 0.003 + 5.12 \times 10^{-3} V_{10} \quad (29)$$

可以得到

$$\tan \theta_n = \sigma \sqrt{-2\ln(1 - \zeta)} \quad (30)$$

$\varphi_n$  随机抽样为

$$\varphi_n = 2\pi\zeta \quad (31)$$

沿  $x$  和  $y$  方向的小波面的斜率可表示为

$$z_x = \frac{dz}{dx} = \tan \theta_n \cos \varphi_n \quad (32)$$

$$z_y = \frac{dz}{dy} = \tan \theta_n \sin \varphi_n \quad (33)$$

如果垂直于小波面的单位矢量为

$$\mathbf{n} = \frac{[z_x, z_y, 1]}{\sqrt{z_x^2 + z_y^2 + 1}} \quad (34)$$

则入射光子相对于小波面的入射角余弦为

$$\cos \theta_i = [\mu_x, \mu_y, |\mu_z|] \quad (35)$$

在确定了各相关过程的概率模型及统计采样方案后,采用蒙特卡洛方法模拟光的传输过程,其流程如图5所示。

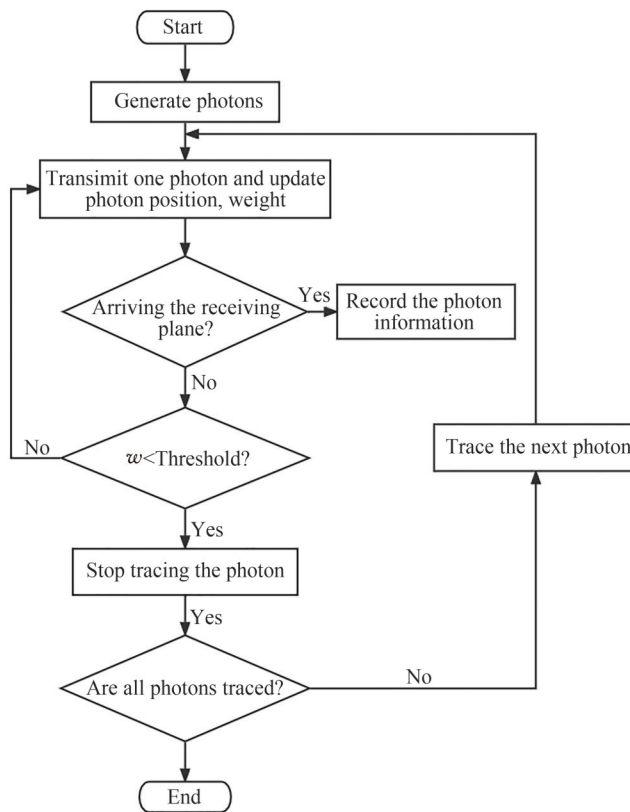


图5 蒙特卡洛仿真流程

Fig. 5 Flow chart of Monte Carlo simulation

仿真输入参数如表4所示,设定发射激光为波长532 nm的高斯光束,发散角为300  $\mu\text{rad}$ ,光束直径为20 mm,高度为36 000 km(以地球同步轨道为例);天气条件为晴天(clear day)、层云和卷云(cloudy day: stratus and cirrus);海面风速为1 m/s、5 m/s、10 m/s和15 m/s,代表不同海况;水体类型为JII(Jerlov水体分类),对应叶绿素浓度0.5  $\text{mg}/\text{m}^3$ ,代表了海洋主要水体特性<sup>[32-33]</sup>;水深为20 m、60 m和100 m。依据以上参数,采用Monte Carlo仿真方法,可得到不同天气条件下激光在大气-海气界面-水体信道的下行跨介质传输特性,包括激光角分布、光斑分布和光斑尺寸。其中,激光角分布定义为单位角度内的能量与全部能量之比随角度的变化,光斑分布定义为接收到的能量与发射能量之比随距离的变化,光斑尺寸为能量衰减到中心



能量的  $1/e^2$  时对应的光斑直径。

表 4 仿真输入参数  
Table 4 Simulation input parameters

Transmitter	Receiver	Channel
Gaussian distribution		Weather conditions:
Divergent angle: 300 $\mu$ rad	Area: 1 m <sup>2</sup>	clear day (visibility 20 km),
Beam width: 20 mm	Depth: 20 m, 60 m and 100 m	cloudy day (stratus, cirrus)
Wavelength: 532 nm		Water type: JII (0.5 mg/m <sup>3</sup> )
Height: 36 000 km		Wind speed: 1 m/s, 5 m/s, 10 m/s, 15 m/s

### 3 激光下行跨介质传输特性仿真分析

采用蒙特卡洛仿真方法,针对三种典型天气条件(晴天、层云和卷云),分别对激光在大气-海气界面-水体信道的下行跨介质传输特性进行仿真分析。

#### 3.1 大气信道

图 6(a)显示了不同天气条件下激光下行传输到海面上的角分布。从图中可以看出,不同天气条件下,激光下行传输到海面的角分布明显不同。晴天时,激光角分布曲线在  $0^\circ$  附近存在一个非常窄的峰,其它角度的幅值非常小;层云时,在  $37^\circ$  附近存在一个非常宽的峰;卷云时,角分布曲线形状复杂,除了在  $0^\circ$  附近有一个非常窄的峰,还在较大角度(约  $22^\circ$  和  $49^\circ$ )存在两个较宽、幅值较小的峰。这是因为激光光场分布与信道介质散射长度及散射相函数有关。晴天条件下,由于气溶胶的散射长度很小,绝大部分激光没有被散射,激光角分布的发散很小。层云条件下介质的散射长度很大,激光被水滴多次散射,导致激光角分布发散严重,在各个角度上均有分布,仿真表明曲线峰值角度约为  $37^\circ$ 。卷云条件下,大部分激光被冰晶散射,但仍有部分未被散射,造成了激光的角分布发散明显且仿真曲线形状复杂。

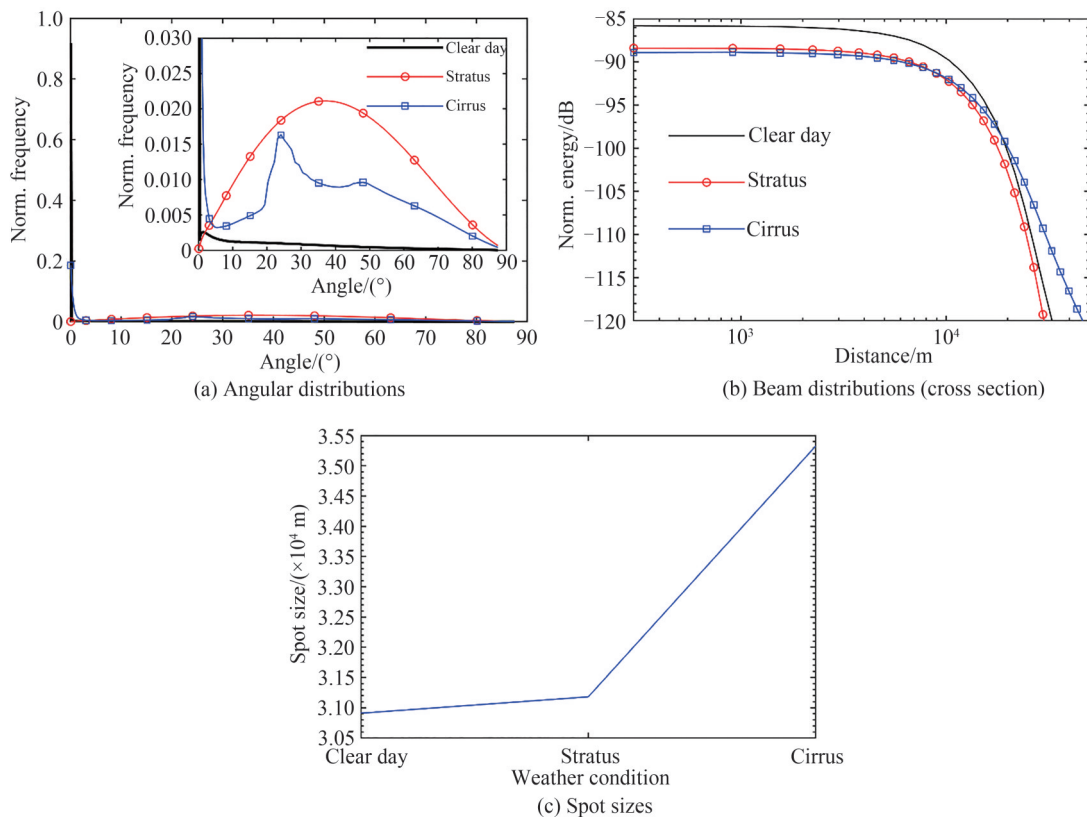


图 6 不同天气条件下海面以上的激光传输特性对比  
Fig. 6 Laser transmission characteristics above sea surface under different weather conditions

图6(b)显示了不同天气条件下激光下行传输到海面上的光斑分布,图6(c)显示了不同天气条件下光斑尺寸的变化。从图中可看出,晴天和层云条件下的光斑尺寸接近,分别约为31 000 m和31 200 m,而在卷云条件下光斑尺寸较晴天时大15%左右,约为35 500 m。这主要是因为卷云离海面的距离远大于层云,激光经过卷云到达海面将经过更长的路径,所以其光斑尺寸也会更大。不同天气条件下,光斑能量有较为明显的差别,晴天时光斑中心归一化能量约为-86 dB,层云条件下约为-88.5 dB,卷云条件下约为-89 dB,这一方面是由于光束扩展,另一方面是大气气溶胶、云的衰减导致。

### 3.2 大气-海气界面

激光下行经过大气、海气界面的传输过程仅考虑激光角分布的变化。三种天气条件下,激光经过大气、海气界面后角分布情况如图7所示,图中0+代表海面以上,0-代表海面以下,WS代表风速(单位为m/s)。

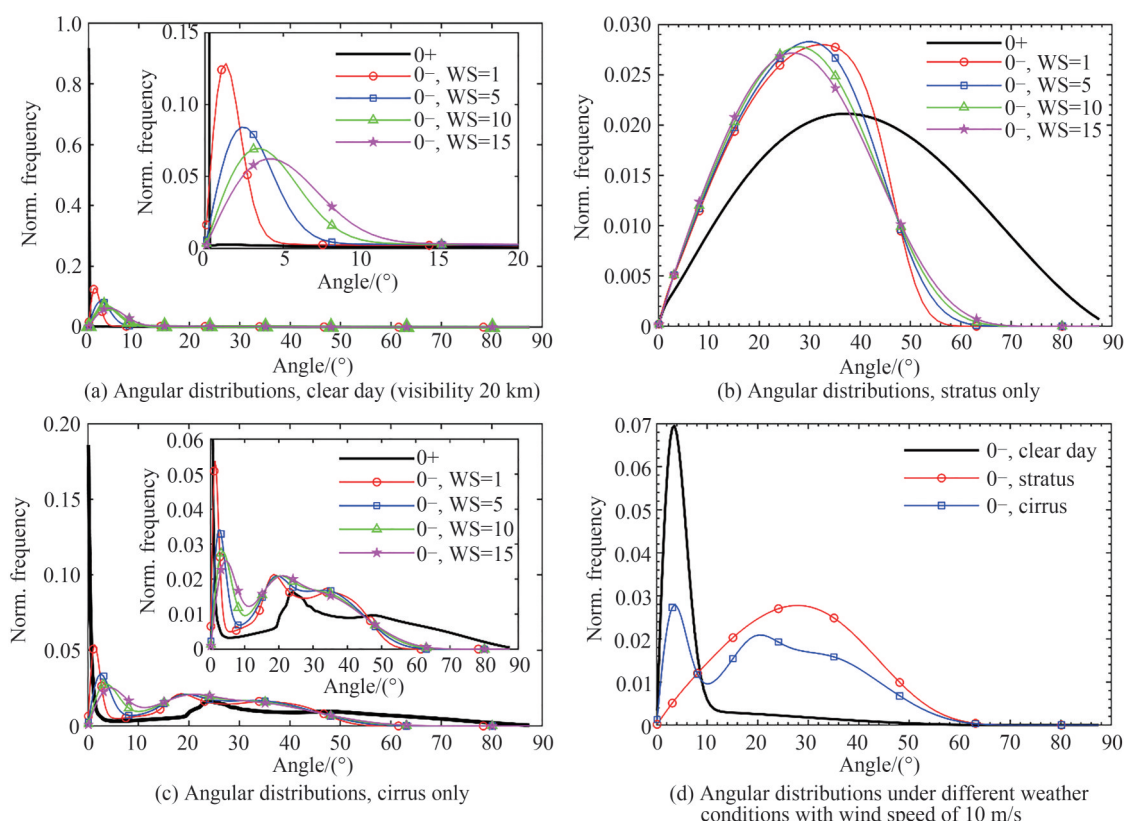


图7 不同天气条件下海面以下激光角分布

Fig. 7 Laser angular distributions below sea surface under different weather conditions

晴天条件下,激光经过大气到达海面时发散很小,但经过海面后发散显著变大,并且随着风速变大激光发散越来越大(如图7(a)所示),一方面,激光角分布的峰值角度变大,如风速为1 m/s时峰值角度约为 $1.5^\circ$ ,而当风速为15 m/s时峰值角度约为 $4^\circ$ ;另一方面,角分布的半高宽也在明显增加,如风速为1 m/s时半高宽约为 $2^\circ$ ,而当风速为15 m/s时半高宽约为 $6^\circ$ 。

层云条件下,激光经过大气到达海面时发散很大,峰值角度约为 $37^\circ$ ,半高宽约为 $55^\circ$ ;在经过海面后,激光的发散明显变小,如风速1 m/s时,峰值角度约为 $34^\circ$ ,半高宽约为 $36^\circ$ ;此外,随风速增加激光发散变小,当风速15 m/s时,峰值角度减小为 $26^\circ$ 左右,半高宽与风速1 m/s时接近(如图7(b)所示)。可见,层云时激光经过海面后发散变小,且随海面风速的增加,发散呈减小趋势,与晴天情况相反。

卷云条件下,激光经过大气到达海面时角分布呈现复杂的变化;经过海面后,在小角度激光发散变大,且随风速增加发散越大;在大角度(如角度大于 $45^\circ$ )激光发散变小,且随风速增加发散越小;中间区域变化较为复杂,如图7(c)所示。

图7(d)显示了在相同风速(10 m/s)三种天气条件下激光经过大气-海气界面的角分布。从图中可以看出,不同天气条件下大气-海气界面信道对激光角分布的影响存在明显的差别。

### 3.3 大气-海气界面-水体信道

图8(a)~(c)分别为晴天、层云和卷云天气条件下水下激光角分布,为便于比较,图中均叠加了海面以上(0+)和海面以下(0-)的角分布。从图中可以看出,晴天时,随着深度的增加,激光的发散越来越严重;但当深度超过60 m以后,角分布趋于稳定,峰值角度约 $26^\circ$ ,半高宽约 $45^\circ$ 。层云和卷云条件下,随着深度的增加,激光角分布的变化具有各自的特点,但当深度超过60 m后角分布同样趋于稳定。

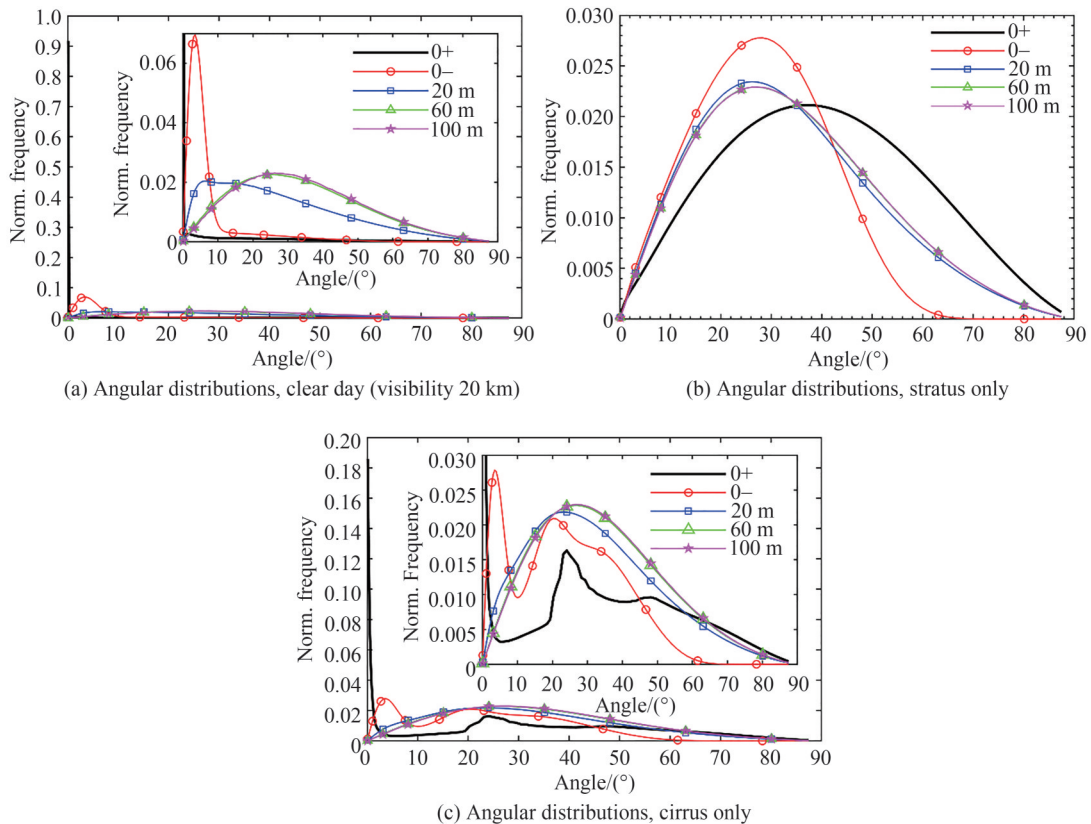


图8 不同天气条件下水下激光角分布(风速10 m/s)

Fig. 8 Laser angular distributions in seawater under different weather conditions with wind speed of 10 m/s

图9(a)~(c)分别为水深20 m、60 m和100 m处激光角分布,其中风速为10 m/s。从图中可以看出,在20 m水深处,三种天气条件下激光角分布的差异较大,角分布峰值角度分别为 $6^\circ$ 、 $26^\circ$ 和 $24^\circ$ ;在60 m水深处,晴天时角分布峰值角度约为 $26^\circ$ ,层云和卷云天气条件下角分布曲线几乎重合,峰值角度约为 $27^\circ$ ;在100 m水深处,三种天气条件下的激光角分布曲线几乎重合,峰值角度约为 $27^\circ$ 。可见,当激光下行到达一定深度后,三种天气下的角分布趋于一致。

图10(a)~(c)分别为三种天气条件下不同水深的光斑分布,分布曲线均呈现以下趋势:在离光斑中心一定距离范围内,光斑能量变化缓慢,超过该范围能量快速减小。晴天时,从0 m到100 m水深,光斑尺寸几乎不变,约为31 000 m;层云条件下,从0 m到100 m水深,光斑尺寸减小了100 m左右;卷云条件下,光斑尺寸由35 300 m(0-)减小为33 800 m(水深100 m),呈较为明显的减小趋势,如图10(d)所示。不同天气条件下光斑中心能量随深度的变化存在一定差异(图11),晴天时平均变化率约为 $-0.410$  dB/m,层云和卷云条件下分别为 $-0.426$  dB/m和 $-0.413$  dB/m。

在水深20 m和100 m处,三种天气条件下光斑特征对比如图12所示。在水深20 m处,三种天气条件下光斑中心能量不同;晴天与层云条件下光斑尺寸相近,约为31 000 m,卷云条件下光斑尺寸明显大于晴天和层云,约为33 300 m,如图12(c)所示。在水深100 m处,晴天时光斑中心归一化能量约 $-126.0$  dB,层云和卷云条件下非常接近,约 $-129.5$  dB;晴天与层云条件下光斑尺寸相近,约为31 000 m,卷云条件下光斑尺寸较大,约为33 800 m,如图12(d)所示。

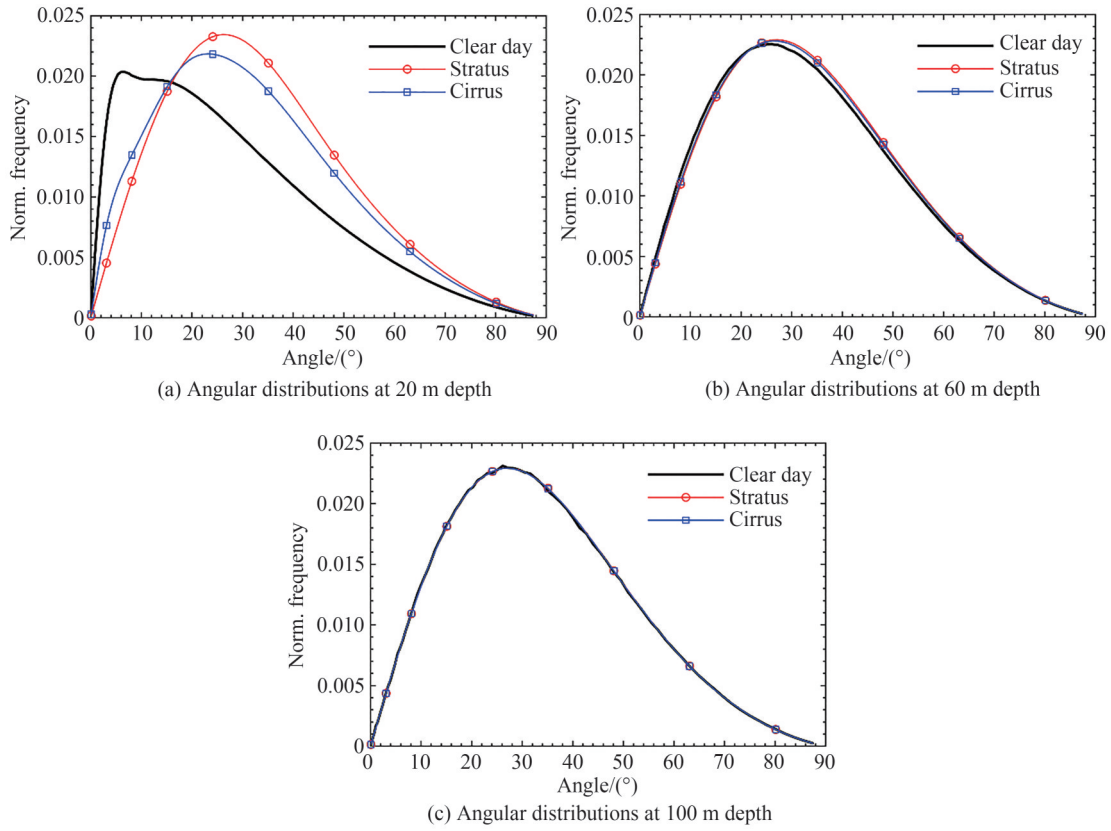


图9 水下深度 20 m、60 m 和 100 m 处激光角分布(风速 10 m/s)

Fig. 9 Laser angular distributions at 20 m, 60 m and 100 m depths with wind speed of 10 m/s

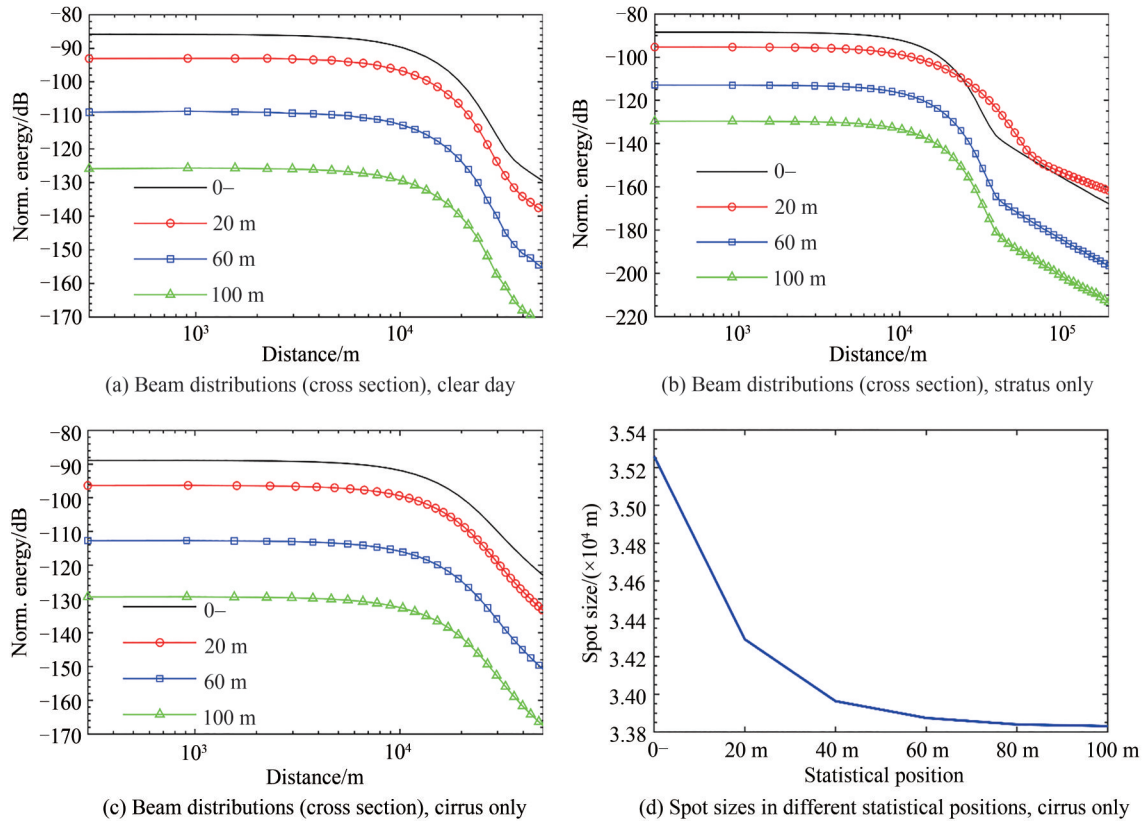


图10 不同天气条件下水下光斑特征(风速 10 m/s)

Fig. 10 Beam characteristics in seawater under different weather conditions with wind speed of 10 m/s

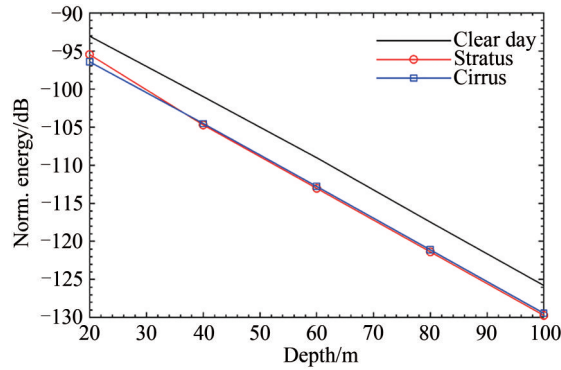


图 11 不同天气条件下光斑中心能量随深度的变化(风速 10 m/s)

Fig. 11 Spot center energy at different depths under different weather conditions with wind speed of 10 m/s

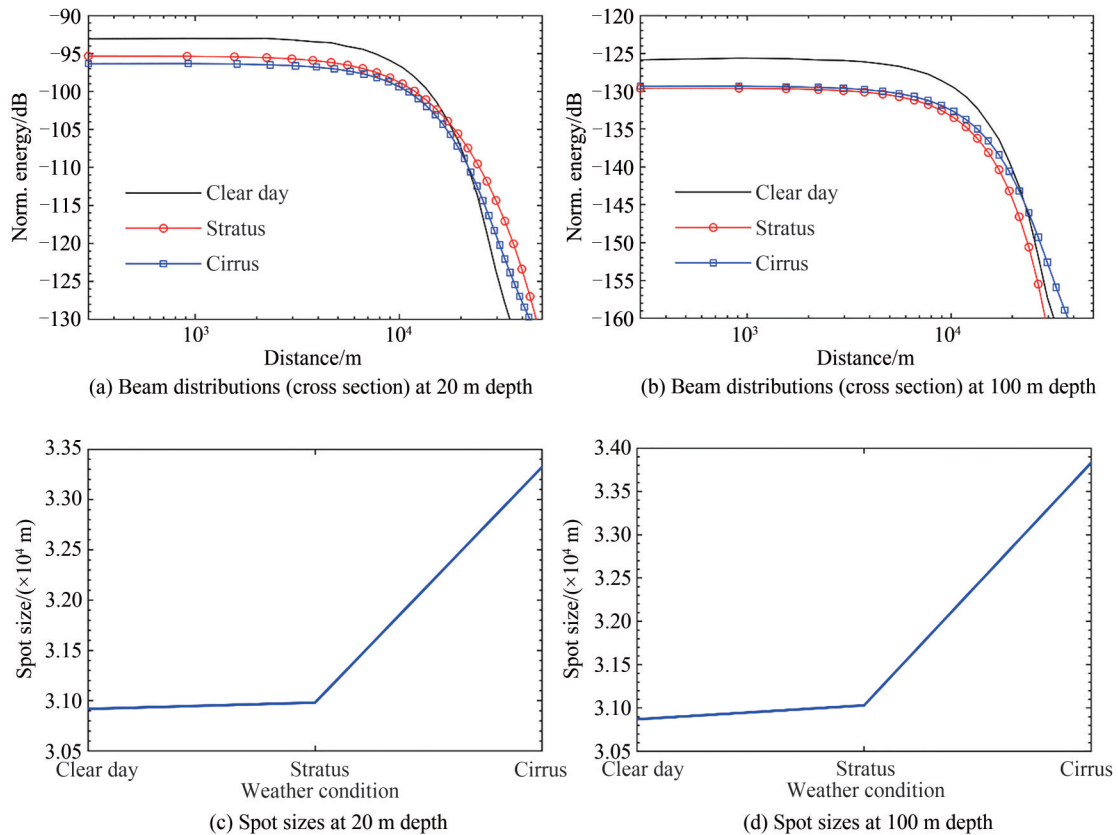


图 12 水下深度 20 m 和 100 m 处光斑特征(风速 10 m/s)

Fig. 12 Beam characteristics at 20 m and 100 m depths with wind speed of 10 m/s

## 4 结论

本文采用蒙特卡洛仿真方法,分析了三种典型天气条件(晴天、层云和卷云)激光下行跨介质传输特性。1)在不同天气条件下,经过大气信道传输到达海面的激光角分布明显不同,晴天时,绝大部分激光没有被气溶胶散射,角分布发散很小;层云条件下,激光被水滴多次散射,角分布发散严重;卷云条件下,大部分激光被冰晶散射,但仍有部分未被散射,角分布发散明显。晴天和层云条件下到达海面的光斑尺寸接近,卷云条件下光斑较晴天时大 15% 左右。2)在不同天气条件下,经过大气、海气界面的激光角分布表现出不同特征。晴天时,海面使激光发散变大,且随风速增加,发散呈变大的趋势;层云条件下,海面使激光发散变小,且随风速增加,发散呈减小的趋势;卷云条件下,海面对激光的影响较为复杂,在小角度海面使激光发散变大,在大角度海面使激光发散变小。3)在不同天气条件下,经过大气、海气界面、水体后到达水下不同深度的激光既有相同的特征,也有不同之处。当水较浅时,晴天条件下激光发散最小,层云最大,卷云居中;当水较深时

(大于 60 m), 三种天气激光角分布趋于一致。晴天和层云条件下的光斑尺寸基本不随水深变化, 卷云条件下随深度增加明显减小。不同天气条件下光斑中心能量随深度的变化存在一定差异, 晴天时平均变化率约为  $-0.410$  dB/m, 层云和卷云条件下分别为  $-0.426$  dB/m 和  $-0.413$  dB/m。需要特别说明的是, 本文考虑的粗糙海面对激光传输的影响是平均效应, 即相同风速下, 不同时刻和不同方向的平均值。

### 参考文献

- [1] BUCHOLTZ A. Rayleigh-scattering calculations for the terrestrial atmosphere[J]. *Applied Optics*, 1995, 34(15): 2765-2773.
- [2] International association for meteorology and atmospheric physics. radiation commission. a preliminary cloudless standard atmosphere for radiation computation[M]. World Climate Research Programme, 1986.
- [3] SHETTLE E P, FENN R W. Models for the aerosols of the lower atmosphere and the effects of humidity variations on their optical properties[R]. Air Force Geophysics Laboratory, 1979.
- [4] HESS M, KOENKE P, SCHULT I. Optical properties of aerosols and clouds: the software package OPAC[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1998, 79(5): 831-844.
- [5] COX C S. Simulating channel losses in an underwater optical communication system[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2014, 31(5): 920-934.
- [6] ELAMASSIE M, MIRAMIRKHANI F, UVSAL M. Performance characterization of underwater visible light communication[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2019, 67(1): 543-552.
- [7] TANG S, DONG Y, ZHANG X. Impulse response modeling for underwater wireless optical communication links[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2014, 62(1): 226-234.
- [8] HE Fengtao, WANG Min, YANG Yi. Analysis of spatial transmission characteristics of laser beam in seawater[J]. *Laser & Infrared*, 2018, 48(11): 1346-1351.  
贺锋涛, 王敏, 杨祎. 激光光束在海水中的空间传输特性分析[J]. *激光与红外*, 2018, 48(11): 1346-1351.
- [9] CHEN P, PAN D, MAO Z, et al. Semi-analytic Monte Carlo radiative transfer model of laser propagation in inhomogeneous sea water within subsurface plankton layer[J]. *Optics & Laser Technology*, 2019, 111(16): 1-5.
- [10] HUANG Aiping, ZHANG Yingluo, TAO Linwei. Monte Carlo simulation on channel characteristics of underwater laser communications[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(4): 0422004.  
黄爱萍, 张莹璐, 陶林伟. 蒙特卡洛仿真的水下激光通信信道特性[J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(4): 0422004.
- [11] MOORADIAN G C, GELLER M. Temporal and angular spreading of blue-green pulses in clouds[J]. *Applied Optics*, 1982, 21(9): 1572-1577.
- [12] AHARONOVICH M, AMON S. Performance improvement of optical wireless communication through fog with a decision feedback equalizer[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2005, 22(8): 1646-1654.
- [13] WANG Hongxia, ZHU Youzhang, TIAN Tao, et al. Characteristics of laser transmission in different types of aerosols[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(2): 024214.  
王红霞, 竹有章, 田涛, 等. 激光在不同类型气溶胶中传输特性研究[J]. *物理学报*, 2013, 62(2): 024214.
- [14] HU Xiuhua, ZHOU Tianhua, ZHU Xiaolei, et al. Simulation of downlink laser pulse propagation through clouds[J]. *Infrared*, 2015, 36(2): 8-12.  
胡秀寒, 周田华, 朱小磊, 等. 云对激光下行传输影响的仿真研究[J]. *红外*, 2015, 36(2): 8-12.
- [15] MCLEAN J W, FREEMAN J D. Effects of ocean waves on airborne lidar imaging[J]. *Applied Optics*, 1996, 35(18): 3261-3269.
- [16] ZHOU Tianhua, CHEN Weibiao, HE Yan, et al. Beam spatial distribution of upward laser through sea-air interface[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(8): 1978-1982.  
周田华, 陈卫标, 贺岩, 等. 通过海气界面的上行激光光场分布[J]. *中国激光*, 2010, 37(8): 1978-1982.
- [17] DONG Y, TANG S, ZHANG X. Effect of random sea surface on downlink underwater wireless optical communications[J]. *IEEE Communications Letters*, 2013, 17(11): 2165-2167.
- [18] LIU Li, YUE Peng, CUI Zongmin. Monte Carlo simulation of uplink transmission across media[J]. *Journal of Xidian University*, 2019, 46(4): 176-181.  
刘力, 岳鹏, 崔宗敏. 跨介质上行激光传输的蒙特卡罗仿真[J]. *西安电子科技大学学报*, 2019, 46(4): 176-181.
- [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] LEATHERS R A, DOWNES T V, MOBLEY C D. Self-shading correction for oceanographic upwelling radiometers[J]. *Optics Express*, 2004, 12(20): 4709-4718.
- [21] ZHAI P W, KATTAWAR G W, YANG P. Impulse response solution to the three-dimensional vector radiative transfer equation in atmosphere-ocean systems. II. The hybrid matrix operator—Monte Carlo method[J]. *Applied Optics*, 2008, 47(8): 1063-1071.

- [22] GABRIEL C, KHALIGHI M A, BOURENNANE S, et al. Monte-Carlo-based channel characterization for underwater optical communication systems[J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2013, 5(1):1-12.
- [23] QADAR R, KASI M K, AYUB S, et al. Monte Carlo-based channel estimation and performance evaluation for UWOC links under geometric losses[J]. *International Journal of Communication Systems*, 2018, 31(6):e3527.
- [24] POPE R M, FRY E S. Absorption spectrum (380–700 nm) of pure water. II. Integrating cavity measurements [J]. *Applied Optics*, 1997, 36(33):8710–8723.
- [25] MOREL A. Optical properties of pure water and pure sea water[M]. New York: Academic Press, 1974.
- [26] BRICAUD A, MOREL A, BABIN M, et al. Variations of light absorption by suspended particles with chlorophyll a concentration in oceanic (case 1) waters: Analysis and implications for bio-optical models [J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 1998, 103(C13):31033–31044.
- [27] MOREL A, MARITORENA S. Bio-optical properties of oceanic waters: a reappraisal [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106(C4): 7163–7180.
- [28] SMITH R C, AUSTIN R W, PETZOLD T J. Volume-scattering functions in ocean waters[M]. *Suspended Solids in Water*, Springer US, 1974.
- [29] BRICAUD A, MOREL A, LOUIS P. Absorption by dissolved organic matter of the sea (yellow substance) in the UV and visible domains[J]. *Limnology and Oceanography*, 1981, 26(1):43–53.
- [30] COX C S, MUNK W H. Statistics of the sea surface derived from sun glitter [J]. *Journal of Marine Research*, 1954, 13(203):198–227.
- [31] CHANDRASEKHAR, SUBRAHMANYAN. Radiative transfer[M]. New York: Dover, 1960.
- [32] JERLOV N G. Marine Optics[M]. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company, 1976.
- [33] MOREL A. Optical modeling of the upper ocean in relation to its biogenous matter content (Case I waters)[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1988, 93(C9):10749–10768.