

复杂海况下激光气-海信道传输特性

李祥震¹, 苗希彩², 仝晓², 韩香娥^{2*}, 卢芳²

¹江苏自动化研究所电子设备事业部, 江苏 连云港 222006;

²西安电子科技大学物理与光电工程学院, 陕西 西安 710071

摘要 在蓝绿激光对潜通信及对潜探测应用中,激光分别通过大气、气-海界面以及海水信道传输。由于海面上方覆盖海雾、风速引起海面粗糙度变化以及覆盖泡沫、海水信道中存在悬浮粒子等多种因素的影响,蓝绿激光传输信道呈现复杂特征。基于米散射理论、粗糙面散射理论及辐射传输理论,针对上述复杂海况开展海雾大气、泡沫覆盖风驱粗糙海面及考虑浮游植物分布的海水信道的激光传输特性研究,并详细讨论了风速、海雾能见度及浮游植物分布对激光功率的衰减作用。结果表明:海雾、粗糙海面泡沫和海水信道中浮游植物对传输激光功率共同起作用,其中海水信道中浮游植物对激光功率的衰减最为显著,风速改变带来的海面粗糙度变化以及覆盖泡沫主要对激光透射角域产生显著影响,同时对激光功率的透射极值产生一定的影响。

关键词 海洋光学; 对潜通信; 米理论; 蓝绿激光; 粗糙海面; 信道特性

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0301002

Laser Atmosphere-Seawater Channel Transmission Characteristics Under Complicated Sea Conditions

Li Xiangzhen¹, Miao Xicai², Qi Xiao², Han Xiang'e², Lu Fang²

¹*Electronic Equipment Department, Jiangsu Automation Research Institute, Lianyungang, Jiangsu 222006, China;*

²*School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China*

Abstract In the applications of blue-green laser submarine communication and submarine detection, laser transmits through the atmosphere, air-sea interface, and seawater channel. The blue-green laser transmission channel presents complicated characteristics due to the influences of the sea fog over the sea surface, the variation of sea surface roughness and foams caused by wind speed, and the suspended particles in the seawater channel. Based on the Mie scattering theory, the rough surface scattering theory, and the vector radiative transfer theory, we study the laser seawater channel transmission characteristics under the above three influences, and discuss the influence of wind speed, sea fog visibility, and phytoplankton distributions on laser power attenuation in detail. The results show that the sea fog, the rough sea surface with foams, and the phytoplankton distributions in seawater channel affect the transmission laser power together. Among them, the influence of phytoplankton distributions in seawater channel on the laser power attenuation is most significant. The variations of sea surface roughness and foams caused by wind speed have a significant influence on the laser transmission angle domain and meanwhile have a certain influence on transmission extremal value of laser power.

Key words oceanic optics; submarine communication; Mie theory; blue-green laser; rough sea surface; channel characteristics

OCIS codes 010.1320; 010.4455; 010.4458

收稿日期: 2017-07-17; 收到修改稿日期: 2017-10-12

基金项目: 江苏省青年基金(BK20130401)

作者简介: 李祥震(1980—),男,博士,高级工程师,主要从事光学探测、图像处理与显示等方面的研究。

E-mail: lixzh@aliyun.com

* 通信联系人。E-mail: xehan@mail.xidian.edu.cn

1 引 言

相比于超低频、甚低频激光通信,蓝绿激光通信因具有穿透能力强、数据率高、不易被侦查等优点而成为对潜通信的主要发展方向之一。对潜通信下行信道主要由大气信道、气-海界面以及海水信道3部分组成。蓝绿激光在上述信道中传输时,大气粒子(原子、分子及气溶胶等)、气-海界面处泡沫、粗糙海面的散射以及海水信道中粒子对激光的吸收和散射作用使得激光功率衰减非常严重,导致接收的光信号很弱。目前对于整体信道的研究大多采用蒙特卡罗方法,通过追踪大量的光子研究传输光束的时间和空间扩展特性^[1-2]、多径效应^[3]、脉冲展宽以及到达角分布^[4]。虽然蒙特卡罗方法在计算粒子散射方面具有独特的优势,但是目前研究对于实际下行信道中气-海界面处的激光传输特性分析不足,考虑海面覆盖泡沫对下行信道激光传输的影响更是鲜有报道。因此本文主要针对考虑泡沫覆盖的风驱粗糙海面,同时考虑实际海面海雾以及海水信道中浮游植物,对激光在不同海况下的下行信道传输特性进行定量分析。

2 下行信道特性分析

在蓝绿激光对潜通信中,激光信号穿过大气、气-海界面以及海水信道到达接收端,由于信道影响因素多、特性差异大,难以形成系统的信道模型,因此分别对海雾大气、泡沫覆盖粗糙海面以及海水信道对传输激光的影响进行评估。

2.1 激光在近海面海雾中的传输特性

在实际理论分析中,有多种描述雾滴尺度的经验公式,其中应用最广的为Gamma分布模型^[5]:

$$n(r) = ar^2 \exp(-br), \quad (1)$$

式中 r 为半径; $n(r)$ 为单位体积单位半径间隔内的雾滴粒子数; a 和 b 为雾滴谱的形状参数,与含水量 W 和能见度 V 有关。海雾中, W 与 V 的关系式为 $W = (18.35V)^{-1.43}$ 。

在研究海雾对光的散射作用时,通常将雾滴粒子视为各向同性的球形粒子,其消光截面 C_{ext} 可由米理论进行严格求解^[6],即

$$C_{\text{ext}} = \frac{2\pi}{k^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \text{Re}(a_n + b_n), \quad (2)$$

式中 $k = 2\pi n_m / \lambda$ 为入射波在周围介质中的波数, λ 为波长, n_m 为周围介质的折射率(此处分析中应取空气的折射率约为1), a_n 、 b_n 为米散射系数。

对于一定尺寸分布的雾滴粒子,假设入射光强

为 $I_0(\lambda)$,激光在海雾中的传输距离为 L ,经雾滴散射后光强为 $I(\lambda)$,衰减前后的光强满足^[7]:

$$T_{\text{fog}} = \frac{I(\lambda)}{I_0(\lambda)} = \exp[-\alpha(\lambda)L], \quad (3)$$

式中 $\alpha(\lambda) = \int_0^{\infty} C_{\text{ext}}(r)n(r)dr$ 为单位体积雾滴粒子的衰减系数。

2.2 激光通过覆盖泡沫粗糙海面的传输特性

在风驱背景下,不仅存在风浪形成的粗糙海面,还会有一定的泡沫覆盖粗糙海面,图1所示为泡沫覆盖粗糙海面的复合结构,泡沫粒子结构如图2所示,泡沫层中的辐射传输方程为^[8]

$$\cos \theta_s \frac{d}{dz} \bar{I}(\theta_s, \phi_s, z) = -k_c \bar{I}(\theta_s, \phi_s, z) + \int_0^{2\pi} d\phi_i \int_0^{\pi} \sin \theta_i \bar{P}(\theta_s, \phi_s; \theta_i, \phi_i) \bar{I}(\theta_i, \phi_i, z) d\theta_i, \quad (4)$$

式中 z 为激光在海水中的传输距离, $\bar{I}(\theta_i, \phi_i, z)$ 和 $\bar{I}(\theta_s, \phi_s, z)$ 分别为入射光强和散射光强, θ_s 、 ϕ_s 分别为散射角和散射方位角, θ_i 、 ϕ_i 分别为入射角和入射方位角, k_c 为泡沫层消光系数, $\bar{P}(\theta_s, \phi_s; \theta_i, \phi_i)$ 为散射相函数矩阵。对于蓝绿激光波段,泡沫粒子尺寸远大于蓝绿激光波段入射波长,因此相函数矩阵的求解应采用球形米粒子散射进行计算,具体计算公式由文献[8]给出。

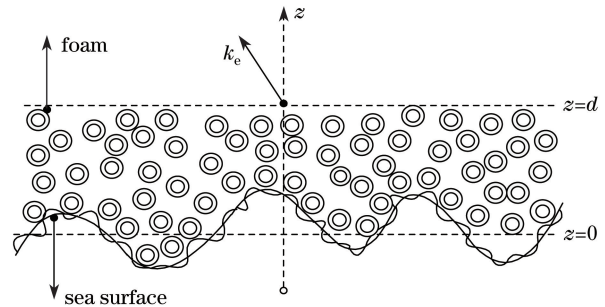


图1 覆盖泡沫粗糙海面

Fig. 1 Rough sea surface with foams

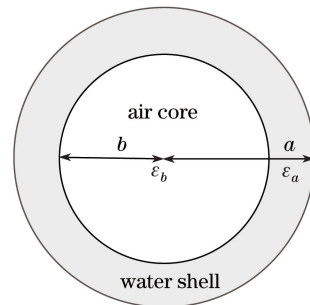


图2 泡沫结构

Fig. 2 Foam structure

覆盖泡沫粗糙海面的双站散射系数可表示为

$$\sigma_{pq}(\theta_s, \phi_s; \theta_i, \phi_i) = \frac{4\pi \cos \theta_s I_{sp}(\theta_s, \phi_s)}{\cos \theta_i I_{iq}(\theta_i, \phi_i)}, \quad (5)$$

式中 p, q 为发射和接收极化状态, $I_{iq}(\theta_i, \phi_i)$ 为入射强度, $I_{sp}(\theta_s, \phi_s)$ 为散射强度。其零阶与一阶散射过程如图 3 所示, 此处仅考虑图 3(b) 所示的激光与泡沫粒子作用一次的散射系数。

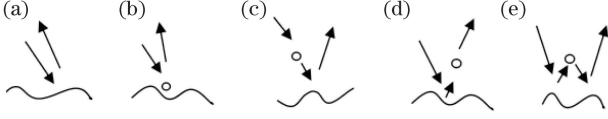


图 3 零阶解和一阶解的散射过程示意图

Fig. 3 Scattering process schematic of the zero-order and the first-order solutions

利用迭代法和边界条件求解散射场强, 得到

$$\sigma_{pq}^{\text{foam}}(\theta_s, \phi_s; \theta_i, \phi_i) = \frac{4\pi}{k_e} \cos \theta_s \bar{P}_{pq}(\theta_s, \phi_s, \pi - \theta_i, \phi_i) \times \{1 - \exp[-k_e d (1/\cos \theta_i + 1/\cos \theta_s)]\}. \quad (6)$$

针对 JONSWAP 型粗糙海面^[9], 由基尔霍夫近似法得到透射时的双基地散射系数为^[10]

$$\sigma_{pq}^{\text{KA-t}}(\theta_t, \phi_t; \theta_i, \phi_i) = \frac{(\eta_1/\eta_2) (k_2 \bar{q} |D_{pq}|)^2}{2\bar{q}_z^4 \delta |\rho''(0)|} \exp\left[-\frac{\bar{q}_x^2 + \bar{q}_y^2}{2\bar{q}_z^2 \delta |\rho''(0)|}\right], \quad (7)$$

式中 θ_t, ϕ_t 分别为透射角和透射方位角, η_1 和 η_2 分

别为介质 1 和介质 2 中的本质阻抗, k_2 为介质 2 中的波数, $\bar{q}_x, \bar{q}_y, \bar{q}_z, q$ 为介质 2 中的散射场参量, δ 为粗糙海面高度起伏均方根, $\rho(0)$ 为粗糙面归一化相关函数, 不同极化状态下 $|D_{pq}|$ 的表达式详见文献^[10], 文中计算均取水平极化。

综上所述, 考虑泡沫覆盖的风驱粗糙海面的总透射系数可表示为

$$\sigma_{pq}^{\text{sensuf-t}}(\theta_t, \phi_t; \theta_i, \phi_i) = C_{\text{foam}} \sigma_{pq}^{\text{foam}}(\theta_t, \phi_t; \theta_i, \phi_i) \times \sigma_{pq}^{\text{KA-t}}(\theta_t, \phi_t; \theta_i, \phi_i) + (1 - C_{\text{foam}}) \sigma_{pq}^{\text{KA-t}}(\theta_t, \phi_t; \theta_i, \phi_i), \quad (8)$$

式中 $C_{\text{foam}} = 2.32 \times 10^{-6} U_{10}$ 为实际海况中大气稳定时的泡沫覆盖率^[11], U_{10} 为海面上方 10 m 处的风速, $\sigma_{pq}^{\text{foam}}(\theta_t, \phi_t; \theta_i, \phi_i)$ 为泡沫双站散射系数。

图 4 给出了不同风速下, 考虑与未考虑泡沫影响时激光透射系数随透射角的变化。随着风速的增加, 泡沫对激光透射系数的影响越来越显著。风速增加, 泡沫覆盖率增大的同时海面粗糙度增加, 从而使得激光透射角域增宽, 激光透射系数极大值出现一定程度的减小。

2.3 激光在海水中的传输特性

光在海水中的衰减主要来自海水中粒子的吸收和散射两种不同的过程。光在海水中传输时呈指数衰减, 即

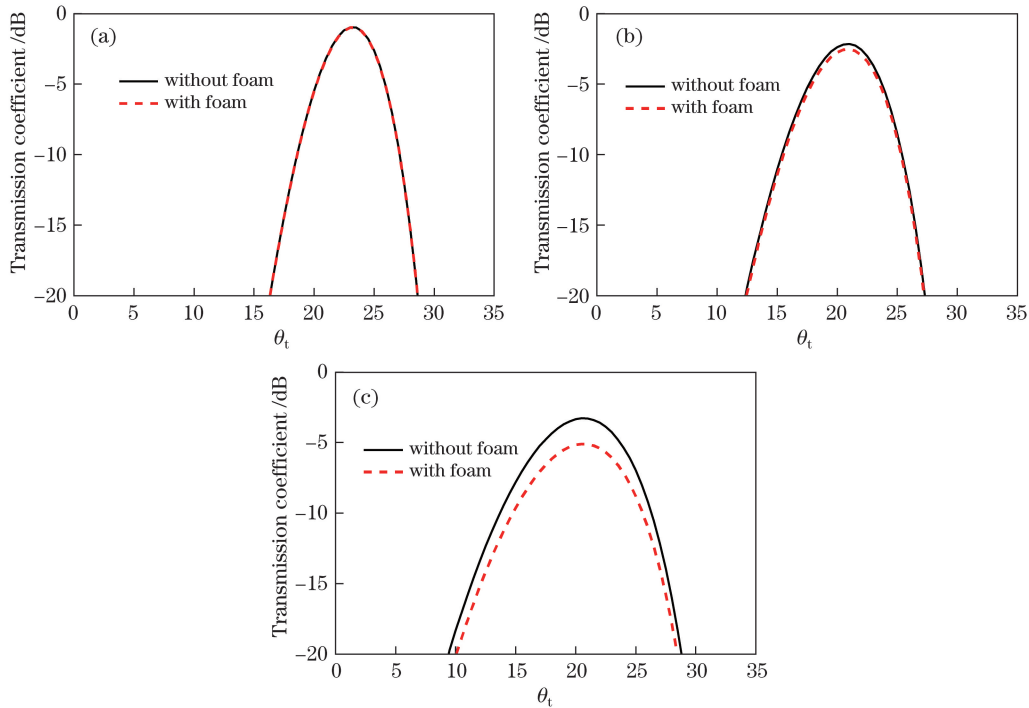


图 4 有无泡沫影响下透射系数随透射角的变化。(a) $U_{10} = 10$ m/s; (b) $U_{10} = 20$ m/s; (c) $U_{10} = 30$ m/s

Fig. 4 Transmission coefficient versus transmission angle with or without foams.

(a) $U_{10} = 10$ m/s; (b) $U_{10} = 20$ m/s; (c) $U_{10} = 30$ m/s

$$P_r = P_t \exp[-\tau(\lambda, z)z], \quad (9)$$

式中 P_r 为接收功率, P_t 为发射功率, $\tau(\lambda, z)$ 为衰减系数。针对 I 类水体, 主要考虑海水与浮游植物对激光的吸收和散射。

海水对激光的吸收主要来自海水中水分子和浮游植物, 其吸收系数可表示为

$$A(\lambda, z) = A_w(\lambda) + A_{ph}(\lambda, z), \quad (10)$$

式中 $A_w(\lambda)$ 为海水水分子的吸收系数, 蓝绿激光波段的吸收系数为 0.04 m^{-1} ; $A_{ph}(\lambda, z)$ 为浮游植物的吸收系数, 用叶绿素的吸收系数表征, 采用 Morel^[12] 参数化方案, 则 $A_{ph}(\lambda, z) = 0.06a(\lambda)C(z)^{0.65}$, 其中 $a(\lambda)$ 为单位衰减系数, $C(z)$ 为叶绿素的浓度。 $C(z)$ 采用 Lewis 等^[13] 提出的高斯函数来表征海水中叶绿素浓度的垂直非均匀分布, 即 $C(z) = c_0 + h/\sigma\sqrt{2\pi}\exp\{-1/2\{[(z-z_{\max})/\sigma]^2\}\}$, 其中 c_0 为背景叶绿素浓度, z_{\max} 为最大叶绿素浓度所对应的深度, σ 为标准偏差, h 表征最大叶绿素浓度。

海水水体总散射系数可以表示为海水水分子和浮游植物散射系数之和, 即

$$B(\lambda, z) = B_w(\lambda) + B_{ph}(\lambda, z), \quad (11)$$

式中 $B_w(\lambda)$ 为海水水分子的散射系数, 可用瑞利散射计算得到, 约为 $1.9 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$; $B_{ph}(\lambda, z)$ 为浮游植物的散射系数, 采用 Morel 给出的经验模型计算得到 $B_{ph}(\lambda, z) = 550/\lambda \times 0.3 \times C(z)^{0.62}$ 。

海水信道中总衰减系数为

$$\tau(\lambda, z) = 0.04 + 0.06a(\lambda)C(z)^{0.65} + 1.9 \times 10^{-3} + 550/\lambda \times 0.3C(z)^{0.62}。 \quad (12)$$

3 仿真结果

基于以上信道衰减模型, 从近海面大气到海水整体信道的透射功率可表示为

$$P_r = P_t T_{\text{fog}} \sigma_{\text{pq}}^{\text{seasuf-t}}(\theta_t, \phi_t; \theta_i, \phi_i) \exp[-\tau(\lambda, z)z], \quad (13)$$

式中 T_{fog} 、 $\sigma_{\text{pq}}^{\text{seasuf-t}}(\theta_t, \phi_t; \theta_i, \phi_i)$ 及 $\tau(\lambda, z)$ 分别由 (3)、(8) 和 (12) 式给出。由此, 气-海信道总的激光透射率可表示为

$$\sigma_t^{\text{total}} = 10\lg(P_r/P_t) = 10\lg T_{\text{fog}} + 10\lg \sigma_{\text{pq}}^{\text{seasuf-t}}(\theta_t, \phi_t; \theta_i, \phi_i) + 10\lg \exp[-\tau(\lambda, z)z]。 \quad (14)$$

下面利用 (14) 式计算不同气象海况条件下的气-海信道激光透射率。数值计算参数选取: 激光波长 $\lambda = 532 \text{ nm}$, 海水温度为 $20 \text{ }^\circ\text{C}$, 盐度为 0.035 。设激光在海雾中的传输距离为 100 m , 气-海界面激光入射角为 30° 。

图 5 主要比较了浓雾、中雾以及薄雾条件下 V 分别取 $100, 500, 1000 \text{ m}$ 且相应风速分别取 $5, 10, 15 \text{ m/s}$ 时蓝绿激光下行信道激光透射率曲线。海水中背景叶绿素浓度为 0.05 mg/m^3 。由图 5 可知, 浓雾对蓝绿激光功率衰减产生相对比较大的影响, 相对于浓雾, V 分别取 500 m 和 1000 m 时, 气-海信道激光透射率曲线差异较小。在透射极值方向上, 风速为 10 m/s 时的透射率略微大于风速为 15 m/s 时的透射率, 表明当能见度达到一定范围时, 风速变化引起的海面粗糙度变化对透射极值的影响大于海雾的影响。在传输距离为 100 m 处, 浓雾条件与薄雾条件的透射率相差约 10.7 dB 。

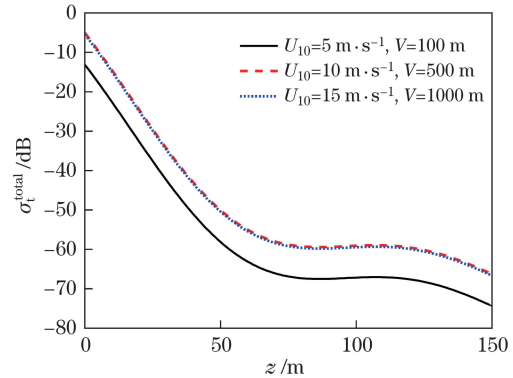


图 5 不同风速及海雾能见度下气-海信道激光透射率曲线

Fig. 5 Laser transmittance curves in atmospheric-seawater channel under different wind speeds and visibilities of sea fog

由于粗糙海面的散射作用, 在一定的激光入射角下, 不同的界面透射角范围都存在透射光。图 6 为激光入射角为 30° 时, 在海水信道中传输 100 m 的接收平面处, 蓝绿激光穿过气-海界面在浓雾、中雾以及薄雾条件下透射率随透射角的变化曲线。在不同条件下, 激光透射率随透射角的变化趋势一致, 均在透射角为折射角附近时取得极大值, 但随风速的增大其分布不同。当风速由 5 m/s 增大到 10 m/s 时, 激光透射率明显增加, 风速的增大不仅会引起海雾可见度的变化, 同时还会引起海面覆盖泡沫率以及海面粗糙度的变化。当风速由 10 m/s 增大到 15 m/s 时, 透射角极值附近的激光透射率产生一定变化, 同时透射系数角域增大, 这也与图 5 结果相对应。在实际水下探测中应尽量选择透射角靠近折射角的位置, 此时功率衰减最小, 可探测性最好。

图 7 给出了海水中以叶绿素浓度分布表征的浮游植物对气-海信道激光透射率的影响。海雾能见度取值为 500 m , 气-海界面入射角为 30° 。由图 7(a)

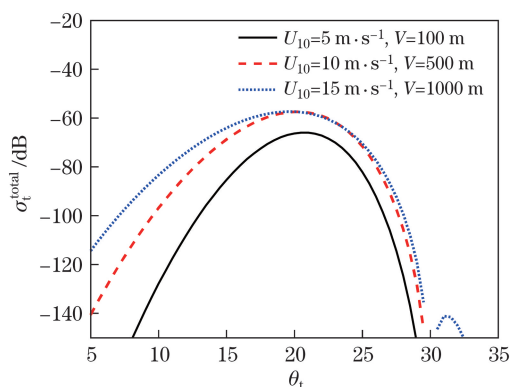


图 6 不同风速及海雾能见度下激光透射率随透射角变化
Fig. 6 Variation in laser transmittance with transmission angle under different wind speeds and visibilities of sea fog

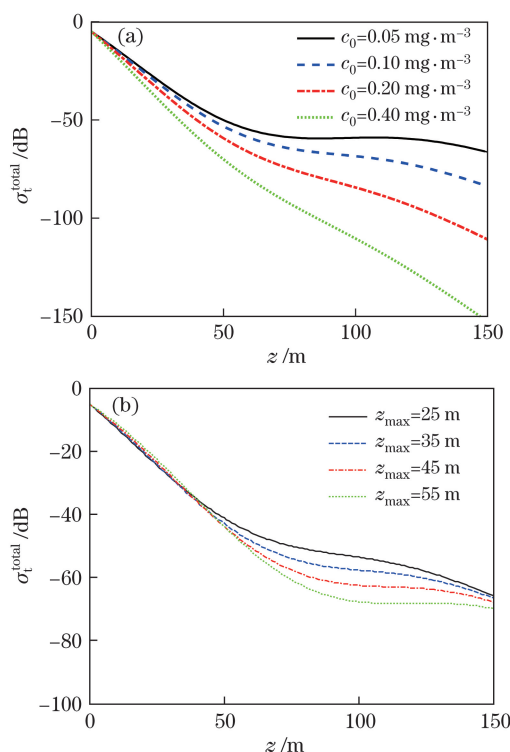


图 7 不同叶绿素浓度分布下激光透射率随传输距离变化。
(a)背景叶绿素浓度;(b)最大叶绿素浓度所处深度
Fig. 7 Variation in laser transmittance with transmission distance under different chlorophyll concentration distributions.
(a) Background chlorophyll concentration;
(b) depth of maximum chlorophyll concentration

可知,不同背景叶绿素浓度下,激光透射率随传输距离的增加而迅速衰减且差异较大,并且衰减速率随背景叶绿素浓度的增加而变大,在传输距离为 100 m 的接收平面处,不同背景叶绿素浓度分布会引起 -59 dB~ -110 dB 的能量衰减差异。这是由于叶绿素浓度增大,表明水中浮游植物浓度增大会对激光功率产生一定的散射和吸收。由图 7(b)可

知,不同最大叶绿素浓度深度对功率衰减的影响呈现先快后缓的变化趋势,在 50~150 m 的传输距离内能量衰减差异最显著,在传输距离为 100 m 的接收平面处,不同背景叶绿素浓度分布会引起 -60 dB~ -80.7 dB 的能量衰减差异,同时当传输距离达到一定深度时,各曲线衰减系数趋向一致。综合图 7(a)、(b)可知,背景叶绿素浓度变化引起的激光功率衰减更为显著。

4 结 论

运用米散射理论分析了不同海雾能见度下激光的传输特性;利用米散射理论、粗糙面散射理论以及矢量辐射传输理论,定量计算了激光通过考虑泡沫的风驱粗糙海面的传输特性;结合海水信道中海水水分子以及叶绿素浓度垂直非均匀分布生物光学模型,计算了不同叶绿素浓度分布对传输激光的影响;基于建立的下行信道模型,研究了激光在整体信道中的传输规律。结果表明:在激光下行信道传输中,海水信道中叶绿素浓度分布对激光透射率的影响最为显著;在风速较小、能见度较小的浓雾状态下,激光功率具有相对较大的衰减,而当能见度达到一定范围($V=500$ m)时,风速变化带来的海面粗糙度变化以及覆盖泡沫主要对激光透射角域产生显著影响,同时对激光功率的透射极值产生一定的影响。此处仅针对 I 类水体开展研究,对于不同类型的水体应采用不同的信道展开模拟讨论。

参 考 文 献

[1] Liang B, Zhu H, Chen W B. Simulation of laser communication channel from atmosphere to ocean[J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(7): 1166-1172.
梁波, 朱海, 陈卫标. 大气到海洋激光通信信道仿真[J]. 光学学报, 2007, 27(7): 1166-1172.

[2] Zhai P W, Kattawar G W, Yang P. Impulse response solution to the three-dimensional vector radiative transfer equation in atmosphere-ocean systems. I. Monte Carlo method[J]. Applied Optics, 2008, 47(8): 1037-1047.

[3] Zhan E Q, Wang H Y. Calculation of energy attenuation of light propagation through atmosphere and seawater[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2009, 42(4): 528-531.
詹恩奇, 王宏远. 光在大气和海水信道中传输的能量衰减计算[J]. 武汉大学学报(工学版), 2009, 42(4): 528-531.

[4] Wei A H. Simulative study of optical pulse propagation properties in atmosphere-seawater hybrid

- channel[D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics Chinese Academy of Sciences, 2014.
- 魏安海. 光脉冲在大气-海水混合信道中传输特性研究[D]. 西安: 中国科学院研究生院(西安光学精密机械研究所), 2014.
- [5] Wang R R. Radiation and transmission characteristics of THz and infrared waves by atmospheric hydrometeors[D]. Xi'an: Xidian University, 2015.
- 王蓉蓉. 大气水凝物中 THz 波和红外波的辐射传输特性[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2015.
- [6] Paerhatjiang T. Optical properties of gold nanoparticles and measurement of its size and concentration by light extinction method[D]. Xi'an: Xidian University, 2014.
- 帕尔哈提江·吐尔孙. Au 纳米颗粒光学特性及粒径浓度消光法测量[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.
- [7] Gao W J, Dou M S, Li J L, *et al.* Effect of offing fog on laser transmittance[J]. *Laser Technology*, 2011, 35(5): 644-647.
- 高文静, 窦茂森, 李金亮, 等. 海面水雾对激光传输的影响分析[J]. *激光技术*, 2011, 35(5): 644-647.
- [8] Jin Y Q, Kong J A. Passive and active remote sensing of atmospheric precipitation[J]. *Applied Optics*, 1983, 22(17): 2535-2545.
- [9] Qi X, Han X E. Study of laser scattering characteristics of rough sea surface with foams[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(8): 0829003.
- 亓晓, 韩香娥. 覆盖泡沫粗糙海面的激光散射特性研究[J]. *光学学报*, 2015, 35(8): 0829003.
- [10] Moore R K, Ulaby F T, Feng J C. Microwave remote sensing volume II: Radar remote sensing and surface scattering and emission theory[M]. Huang P K, Wang Y F, Transl. Beijing: Science Press, 1987: 297-304.
- 穆尔 R K, 乌拉比 F T, 冯健超. 微波遥感第二卷: 雷达遥感和面目标的散射、辐射理论[M]. 黄培康, 汪一飞, 译. 北京: 科学出版社, 1987: 297-304.
- [11] Liang Y, Guo L X. Study of the electromagnetic scattering from the rough sea surface with bubbles/foams by the modified two-scale method[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, 58(9): 6158-6166.
- 梁玉, 郭立新. 气泡/泡沫覆盖粗糙海面电磁散射的修正双尺度法研究[J]. *物理学报*, 2009, 58(9): 6158-6166.
- [12] 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(9): 10749-10768.
- [13] Lewis M R, Cullen J J, Platt T. Phytoplankton and thermal structure in the upper ocean: Consequences of nonuniformity in chlorophyll profile[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1983, 88(4): 2565-2570.