

基于大气-海浪-海洋耦合模型的光传输相干特性

于波 包旭东 宋薇 孟凡军

Coherence characteristics of optical transmission based on an atmosphere-wave-ocean coupling model

YU Bo, BAO Xu-dong, SONG Wei, MENG Fan-jun

引用本文:

于波, 包旭东, 宋薇, 孟凡军. 基于大气-海浪-海洋耦合模型的光传输相干特性[J]. 中国光学, 优先发表. doi: 10.37188/CO.2025-0152

YU Bo, BAO Xu-dong, SONG Wei, MENG Fan-jun. Coherence characteristics of optical transmission based on an atmosphere-wave-ocean coupling model[J]. *Chinese Optics*, In press. doi: 10.37188/CO.2025-0152

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2025-0152>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

大气湍流对高分辨率遥感卫星的成像影响研究

Effect of atmospheric turbulence on imaging quality of high-resolution remote sensing satellites

中国光学 (中英文). 2024, 17(1): 167 <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0083>

大气湍流对高分辨率遥感卫星定位精度的影响分析

Effect of atmospheric turbulence on the tracking accuracy of high-resolution remote sensing satellites

中国光学 (中英文). 2023, 16(3): 550 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0196>

基于主成分分析法的大气湍流相位畸变表征和还原影响因素分析

Influencing factor of the characterization and restoration of phase aberrations resulting from atmospheric turbulence based on Principal Component Analysis

中国光学 (中英文). 2025, 18(4): 899 <https://doi.org/10.37188/CO.EN-2024-0035>

单波长激光通信终端的隔离度

Isolation of single wavelength laser communication terminals

中国光学 (中英文). 2023, 16(5): 1137 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0253>

大气多输入-多输出光信道共享密钥提取研究

Shared secret-key extraction from atmospheric MIMO optical channel

中国光学 (中英文). 2024, 17(5): 1219 <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0202>

快速反射镜的复合快速非奇异终端滑模控制

Composite fast nonsingular terminal sliding mode control of fast steering mirror

中国光学 (中英文). 2024, 17(4): 959 <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0203>

文章编号 2097-1842(xxxx)x-0001-10

基于大气-海浪-海洋耦合模型的光传输相干特性

于波^{1*}, 包旭东^{1,2}, 宋薇¹, 孟凡军^{1*}

- (1. 长春理工大学 计算机科学技术学院, 吉林 长春 130022;
2. 中国航天科工集团第六研究院 科研生产部, 内蒙古 呼和浩特 010010)

摘要: 针对激光在空海跨域下行传输过程中受到大气湍流、气-海界面扰动和海洋湍流等多源、多尺度复杂扰动的影响, 研究了光束空间相干性的演化规律, 并提出了一种基于复合扰动模型的分析方法。基于 Kolmogorov 理论、Pierson-Moskowitz (P-M) 海面波动谱以及斜程海洋折射率空间功率谱, 构建了空海跨域复合扰动模型; 结合 Rytov 近似理论, 建立了互相干函数与波结构函数的解析关系, 并进一步推导了高斯光束在斜程海洋湍流中的波结构函数表达式。各模型组件均通过独立验证。结果表明, 湍流强度、传输距离及环境参数的变化均会显著影响光束的空间相干性, 从而对跨域空间光通信系统性能产生重要影响。与单一湍流近似模型相比, 所提出的复合扰动模型能够有效修正近似模型空间相干性的预测偏差, 修正幅度约为 20%-30%, 并揭示了多源扰动对光束空间相干性演化规律的作用机制。该复合扰动模型为空海跨域光通信链路的性能评估与系统优化提供了有效支撑, 有助于提升实际环境中光通信系统的稳定性与可靠性。

关键词: 激光通信; 大气湍流; 气-海界面扰动; 海洋湍流; 互相干函数; 波结构函数

中图分类号: TN929.1 文献标志码: A doi: 10.37188/CO.2025-0152 CSTR: 32171.14.CO.2025-0152

Coherence characteristics of optical transmission based on an atmosphere-wave-ocean coupling model

YU Bo^{1*}, BAO Xu-dong^{1,2}, SONG Wei¹, MENG Fan-jun^{1*}

- (1. School of Computer Science and Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;
2. the 6th Academy, CASIC, Hohhot, 010010, China)

* Corresponding author, E-mail: 2023200165@mails.cust.edu.cn; 2022800001@cust.edu.cn

Abstract: During downward laser transmission across the air-sea domain, beam propagation is influenced by a range of complex, multi-source and multi-scale perturbations, including atmospheric turbulence, fluctuations at the air-sea interface, and oceanic turbulence. This study investigates the evolution of beam spatial coherence and introduces an analytical approach based on a composite perturbation model. The composite model integrates Kolmogorov turbulence theory, the Pierson-Moskowitz (P-M) sea-surface wave spectrum, and the slant-path oceanic refractive-index power spectrum. By employing the Rytov approximation, analyt-

收稿日期: 2025-12-05; 修订日期: xxxx-xx-xx

基金项目: 吉林省教育厅博士研究生科研创新能力提升项目 (No. JJKH20250528BS)

Supported by the Doctoral Research Innovation Capability Enhancement Program of the Jilin Provincial Department of Education (No. JJKH20250528BS)

ical expressions for the mutual coherence function and wave structure function are derived, with particular focus on the wave structure function of a Gaussian beam propagating through slant-path oceanic turbulence. Each component of the model has been individually validated. Experimental results demonstrate that variations in turbulence intensity, propagation distance, and environmental parameters significantly affect beam spatial coherence, thereby exerting a substantial impact on the performance of cross-domain optical communication systems. Compared to single-turbulence approximation models, the proposed composite perturbation model effectively reduces the spatial coherence bias by approximately 20%-30%, revealing the influence mechanisms of multi-source perturbations on coherence evolution. This model provides an effective theoretical foundation for the performance evaluation and optimization of air-sea optical communication links and enhances the stability and reliability of optical communication systems under realistic conditions.

Key words: laser communication; atmospheric turbulence; air-sea interface fluctuation; oceanic turbulence; mutual coherence function; wave structure function

1 引言

随着空海跨域通信在跨域信息网络、海洋监测与水下数据传输等领域的广泛应用^[1],其在跨域协作中逐渐成为水下数据与控制指令等信息交换的关键节点。在激光下行传输过程中,光束需依次穿越大气、气-海界面及海水等复杂介质,其空间相干性在光学湍流及气-海界面扰动的共同作用下逐渐退化,从而显著削弱通信链路的稳定性与系统整体性能。

目前,激光空海跨域传输性能受到大气湍流、海洋湍流以及气-海界面等多源耦合扰动的显著影响。近地面大气通常处于湍流状态^[2];而海水中温盐变化及流动紊乱同样会形成更为复杂的湍流结构^[3],其主要影响表现为削弱光束的空间相干性^[4];同时,气-海界面结构的动态变化也会对下行传输过程产生重要影响^[5]。已有研究从理论与实验两方面系统探讨了大气湍流中的激光传播特性^[6-9],例如建立球面波结构函数并验证交叉谱密度函数的有效性^[7],提出基于复杂 ABCD 矩阵的双频互相关函数描述方法^[8],以及推导大气光学波动的统计谱模型^[9];此外,还有研究基于相位屏方法分析了一维阵列涡旋光束在海面大气湍流中的传输特性^[10],基于投影光瞳分布进行星地激光通信波前探测^[11],以及采用蒙特卡洛仿真方法研究高斯光束在大气湍流中的传输行为^[12]。近年来,针对海洋湍流中激光传播特性的研究不断深入,数值仿真方法已广泛应用于光波的相干特性^[13]、

偏振特性^[14]、闪烁指数^[15]、光束扩展^[16]及强度分布^[17]等方面。然而,对于激光在多层扰动介质中传播时空间相干性退化的机理及其演化规律,仍缺乏系统性的研究。

基于此,本文在前期关于平面波和球面波相干性研究^[18-19]的基础上,提出了一种融合大气湍流、气-海界面扰动及海洋湍流的空间相干性建模方法。以高斯光束为研究对象,基于 Rytov 近似理论系统分析多类扰动对光束空间相干性的影响,并推导互相干函数(Mutual Coherence Function, MCF)与波结构函数(Wave Structure Function, WSF)的统一解析关系。进一步通过数值仿真研究光源与湍流参数对跨域传输过程中光束空间相干性的影响规律,为空海跨域光通信链路的性能评估与系统优化提供理论支撑。

2 激光下行光传输相干模型

如图 1 所示,光束在下行传输过程中依次穿越大气湍流区、气-海界面扰动层以及海洋湍流区。其中,大气信道的非均匀折射率分布会引起光波波前畸变;气-海界面的动态波浪起伏会对光束产生附加相位调制;海水信道的湍流效应则进一步降低光场的空间相干性。在多源扰动的耦合作用下,光束在不同传输区域均会经历随机相位扰动,从而导致空间相干性逐渐退化。这些效应显著限制了跨域光通信链路的稳定性与可靠性,并构成跨域信道建模与性能评估的关键科学问题。为此,本文在统计光学理论框架下,构建了一

个同时包含大气湍流、气-海界面扰动以及海洋湍流影响的统一数学模型, 为后续 MCF 推导及数值仿真分析奠定理论基础。

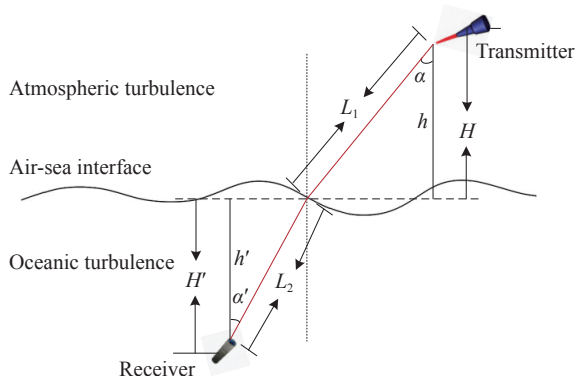


图 1 空气-海洋跨域下行激光通信示意图

Fig. 1 Schematic diagram of air-sea downlink laser communication

该传输链路可划分为大气湍流区、气-海界面层及海洋湍流区, 对应的传输距离分别记为 L_1 、 L 和 L_2 。其中, 大气湍流区通过大气湍流功率谱模型表征; 气-海界面扰动基于随机过程理论简化为无限大相位屏模型, 在该模型中, 光波波前受到动态海面引入的随机相位调制, 从而表征海面波

$$\begin{aligned} \Gamma_2^{(\text{atm})}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, L_1) = & \Gamma_2^0(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, L_1) \exp\{-4\pi^2 k^2 \sec(\alpha)\} \int_{h_0}^H \int_0^\infty \kappa \Phi_n(\kappa, h) \left[1 - \exp\left(-\frac{\Lambda L_1 k^2 \zeta^2}{k}\right) J_0\left[\kappa \left| (1 - \bar{\Theta}\zeta) \mathbf{p} - 2i\Lambda\zeta \mathbf{r} \right| \right] \right] \mathrm{d}\kappa \mathrm{d}h = \\ \Gamma_2^0(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, L_1) \exp\{-4\pi^2 k^2 \sec(\alpha)\} & \int_{h_0}^H \int_0^\infty \kappa \left[0.033 \left(0.00594 \left(\frac{V}{27} \right) (10^{-5} h)^{10} \times \right. \right. \\ \exp\left(-\frac{h}{1000}\right) + 2.7 \times 10^{-16} \exp\left(-\frac{h}{1500}\right) & \left. \left. + C_n^2(0) \exp\left(-\frac{h}{1000}\right) \kappa^{-11/3} \right) \right] \times \\ \left[1 - \exp\left(-\frac{\Lambda L_1 k^2 \zeta^2}{k}\right) \times J_0\left[\kappa \left| (1 - \bar{\Theta}\zeta) \mathbf{p} - 2i\Lambda\zeta \mathbf{r} \right| \right] \right] & \mathrm{d}\kappa \mathrm{d}h, \end{aligned} \quad (3)$$

式中, $\Gamma_2^0(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, L_1)$ 表示无湍流条件下的 MCF, L_1 表示光束在湍流大气中的斜程传输距离, k 为波数, α 为天顶角, $\Phi_n(\kappa, h)$ 为与垂直路径相关的折射率功率谱函数, 采用 Kolmogorov 湍流模型 $\Phi_n(\kappa, h) = 0.033 C_n^2(h) \kappa^{-11/3}$ [4]; 大气湍流结构常数 $C_n^2(h)$ 采用经典 Hufnagel-Valley(H-V) 模型[20], Λ 为接收面上的光束菲涅尔比, Θ 与 $\bar{\Theta}$ 为接收面曲率参数, $J_0(\cdot)$ 为零阶贝塞尔函数。变量定义为 $\mathbf{r} = (\mathbf{r}_1 + \mathbf{r}_2)/2$, $\mathbf{p} = \mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2$, $r = |\mathbf{r}|$, $\rho = |\mathbf{p}|$ 。 h 为光束到达接收机孔径处的垂直传输高度, $H = h_0 + L_1 \cos(\alpha)$ 为发射机相对于理想水平海面的垂直高度, $\zeta = \frac{h - h_0}{H - h_0}$

动的统计特性及其空间相关性, 如图 1 所示; 海洋湍流区则考虑折射率波动在垂直方向上的分布特性, 并采用相应的海洋湍流功率谱模型进行描述。

2.1 激光大气湍流下行传输相干模型

MCF 是描述接收面上两点光场统计相关性的核心指标, 其定义为[20]

$$\Gamma_2(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, L) = \langle U(\mathbf{r}_1, L) U^*(\mathbf{r}_2, L) \rangle, \quad (1)$$

式中, $U(\mathbf{r}, L)$ 为传播至 $z=L$ 处的光场, $*$ 为复共轭, $\langle \cdot \rangle$ 为系综平均。

当激光进入大气湍流区时, 其波前会受到湍流引起的随机相位扰动。基于 Rytov 近似理论以及湍流相位扰动的随机过程建模, $U(\mathbf{r}, L)$ 可表示为无湍流自由空间传播光场与随机相位扰动项的乘积[20]

$$U(\mathbf{r}, L) = U_0(\mathbf{r}, L) \langle \exp[\psi_1(\mathbf{r}, L)] + [\psi_2(\mathbf{r}, L)] \rangle, \quad (2)$$

式中, $U_0(\mathbf{r}, L)$ 为无湍流条件下的传播光场, $\psi_1(\mathbf{r}, L)$ 与 $\psi_2(\mathbf{r}, L)$ 分别表示一阶和二阶扰动项。进一步展开扰动项, 可得到大气湍流条件下 MCF 的解析表达式[20]

为归一化传输距离。式(3)将大气湍流效应转化为波数域积分形式, 从而实现了统计光学理论与物理湍流模型的有效结合。

假设发射光束为单位振幅的高斯光束。当光束在自由空间中传输至 $z=L_1$ 时, 接收面 $z=L_1$ 处的光场表达式[20]为 $U_0(\mathbf{r}, L_1) = \frac{1}{p(L_1)} \exp(ikL_1) \exp\left(-\frac{r^2}{W^2} - i\frac{kr^2}{2F}\right)$, 其中 $z=L_1$ 处接收面的波前曲率半径和光束半径分别为 F 与 W , 无量纲传输参数为 $p(L_1)$ 。在对称观测点 $\mathbf{r}_2 = -\mathbf{r}_1$ 的条件下, 高斯光束的 MCF 仅依赖于两点间距 ρ 。此时, 波结构函数 WSF 可表示为[20]

$$D(\rho, L_1) = 2.91k^2\rho^{5/3} \sec(\alpha) \left(\mu_1 + 0.62\mu_2\Lambda^{11/6} \right), \quad (4)$$

其中,

$$\begin{aligned} \mu_1 &= \int_{h_0}^H C_n^2(h) \left[\Theta + \bar{\Theta} \left(1 - \frac{h-h_0}{H-h_0} \right)^{5/3} \right] dh, \\ \mu_2 &= \int_{h_0}^H C_n^2(h) \left(\frac{h-h_0}{H-h_0} \right)^{5/3} dh, \end{aligned} \quad (5)$$

2.2 气-海界面激光传输相干模型

当光束传播至气-海界面时,海面起伏对光束波前的影响不可忽视。为了定量描述海浪能量随频率及传播方向的分布特征,本文采用 Pierson-Moskowitz(P-M) 海浪谱模型^[21],并结合方向分布函数^[22]构建三维波浪能量谱,从而实现海面高度的随机过程统计建模,并模拟海面起伏对光束传播的影响。在本模型中,仅考虑海面引入的相位调制,而忽略由海面斜率变化引起的几何光束漂移。设 \mathbf{R}_1 与 \mathbf{R}_2 分别表示气-海界面上的两个空间点坐标, $\mathbf{R}=\mathbf{R}_2-\mathbf{R}_1$, 则经过气-海界面扰动后的 MCF 可表示为

$$\begin{aligned} \Gamma_2^{\text{inter}} &= \Gamma_2^{\text{atm}} \cdot \langle \exp[-i\varphi(\mathbf{R}_1)] \exp[i\varphi(\mathbf{R}_2)] \rangle = \\ & \Gamma_2^{\text{atm}} \cdot \exp\langle [\Gamma_h(\mathbf{R}) - \Gamma_h(0)] \rangle, \end{aligned} \quad (6)$$

其中,气-海界面的传播路径为 $R=R_0/\cos(\alpha)$, R_0 为垂直方向上的传播路径长度; Γ_h 为波面高度相关函数,通过对 P-M 波浪谱进行傅里叶逆变换即可获得。

当入射光在空气-海水界面发生反射与折射时,其反射光和折射光的空间分布存在明显差异,如图 2 所示。根据斯涅尔定律

$$n \sin \theta_i = n_0 \sin \theta_t, \quad (7)$$

其中, n 与 n_0 分别为空气与海水的折射率, θ_i 和 θ_t 分别表示为入射角与折射角。假设大气段光束的天顶角 α 与气-海界面处的入射角 θ_i 相等,即 $\alpha=\theta_i$ 。

$$\Gamma_2^{(\text{ocean})}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, L_2) =$$

$$\begin{aligned} & \Gamma_2^0(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, L_2) \exp \left\{ -4\pi^2 k^2 \sec(\alpha') \int_{h_0}^H \int_0^\infty \kappa \Phi_n(\kappa, h') \left[1 - \exp \left(-\frac{\Lambda L_2 \kappa^2 \zeta^2}{k} \right) J_0 \left[\kappa \left| (1 - \bar{\Theta} \zeta) \mathbf{p} - 2i\Lambda \zeta \mathbf{r} \right| \right] \right] d\kappa dh' = \right. \\ & \Gamma_2^0(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, L_2) \exp \left\{ -4\pi^2 k^2 \sec(\alpha') \int_{h_0}^H \int_0^\infty \kappa \frac{[1 + C_1(\kappa l_0)^{2/3}]}{4\pi(\kappa^2 + \kappa_0^2)^{11/6}} \left\{ C_T^2(h') \exp \left[-\frac{(\kappa l_0)^2}{R_T^2} \right] + \right. \right. \\ & \left. \left. C_S^2(h') \exp \left[-\frac{(\kappa l_0)^2}{R_S^2} \right] - C_{TS}^2(h') \exp \left[-\frac{(\kappa l_0)^2}{R_{TS}^2} \right] \right\} \left[1 - \exp \left(-\frac{\Lambda L_2 \kappa^2 \zeta^2}{k} \right) J_0 \left[\kappa \left| (1 - \bar{\Theta} \zeta) \mathbf{p} - 2i\Lambda \zeta \mathbf{r} \right| \right] \right] d\kappa dh' \quad , \end{aligned} \quad (9)$$

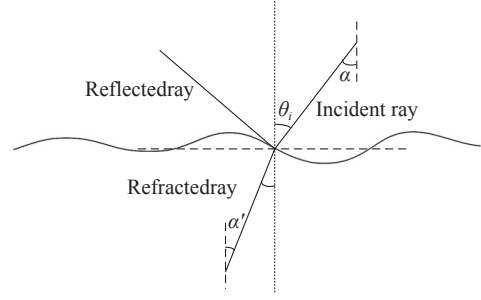


图 2 动态海面反射光和折射光分布示意图

Fig. 2 Schematic diagram of reflected and refracted light distribution on a dynamic sea surface

2.3 激光海洋湍流下行传输相干模型

本文假设海水介质的平均法向方向与重力方向一致,在海洋湍流区内,光束传播方向与折射方向相同,因此,海洋湍流区的天顶角 α' 与折射角相等,即 $\alpha'=\theta_t$ 。此外,本文将海水视为均匀且清洁的理想介质。海洋湍流建模基于非稳态分层折射率波动功率谱 (Power Spectrum of Refractive-index Fluctuations, PSORF) 模型,该模型综合考虑了内外尺度、温盐梯度及潮汐拖拽效应^[23]:

$$\begin{aligned} \Phi_n'(\kappa, h') &= \frac{[1 + C_1(\kappa l_0)^{2/3}]}{4\pi(\kappa^2 + \kappa_0^2)^{11/6}} \left\{ C_T^2(h') \exp \left[-\frac{(\kappa l_0)^2}{R_T^2} \right] + \right. \\ & C_S^2(h') \exp \left[-\frac{(\kappa l_0)^2}{R_S^2} \right] - \\ & \left. C_{TS}^2(h') \exp \left[-\frac{(\kappa l_0)^2}{R_{TS}^2} \right] \right\}, \end{aligned} \quad (8)$$

式中,常数 C_1 取值范围为 4.6-5; l_0 为海洋湍流内尺度; κ 为空间波数, $\kappa_0=1/L_0$, 其中 L_0 为海洋湍流外尺度; R_i 为温度和盐度相关参数;参照大气湍流模型中的温度结构参数^[20], $C_T^2(h')$ 为海洋湍流温度结构函数;潮汐拖拽系数 $C=0.004$ ^[24], $C_S^2(h')$ 为盐度结构函数,参数 J 用于区分强风与弱风条件^[25]; $C_{TS}^2(h')$ 为斜程传播条件下的温盐结构函数。结合式(3)与(8)可进一步推导得到光束在海洋湍流中传播的相干传播模型

结合 Rytov 近似理论与傍轴近似条件, 当 $r_1=-r_2$ 时, 可进一步推导得到高斯光束在海洋湍

流中的 WSF 表达式

$$D(\rho, L_2) = \frac{\pi k^2 \rho^2 \sec(\alpha')}{2} \left[(\Delta\zeta)^2 + (1 - \bar{\Theta}\zeta)^2 \right] \times \int_{h'_0}^{H'} \int_0^\infty \frac{1 + C_1(\kappa l_0)^{2/3}}{(\kappa^2 + \kappa_0^2)^{11/6}} \left\{ C_T^2(h') \exp^{-(\kappa l_0)^2/R_T^2} + C_S^2(h') \exp^{-(\kappa l_0)^2/R_S^2} - C_{TS}^2(h') \exp^{-(\kappa l_0)^2/R_{TS}^2} \right\} \times \kappa^3 \exp^{-\Lambda L_2 \kappa^2 \zeta^2 / k} d\kappa dh' \quad (10)$$

式中, h'_0 与 H' 分别表示光波在海水中传输的起始深度与最大传播深度, 用于描述不同深度湍流对光束传播过程的影响。式(10)能够有效描述海洋湍流对光波波前统计特性的影响。

3 仿真分析与讨论

本文构建了一个多物理过程耦合的空间相干性分段积分模型。与现有多数仅针对单一介质相干特性开展研究的模型相比, 该模型能够统一描述空海跨域激光下行传输过程中多源、多尺度扰动的耦合作用机理。在该框架下, 大气湍流、气-海界面扰动以及海洋湍流被视为连续级联的随机扰动过程, 并通过 MCF 和 WSF 对光场空间相干特性的演化进行定量表征。

本节通过数值仿真系统分析高斯光束在空海跨域下行传输过程中 MCF 和 WSF 的变化规律。为保证仿真结果的可比性与稳定性, 除特别说明外, 仿真参数统一设置如下: 发射面的菲涅尔比为 $\Lambda_0 = 1$, 发射面的曲率参数为 $\Theta_0 = 1$, 均方根风速 $V=21$ m/s, 地面湍流结构常数 $C_n^2(0) = 1.7 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$, 重力加速度 $g=9.81$ m/s², 空气与海水折射率分别为 $n=1$ 和 $n_0=1.34$, $l_0 = 0.001$ m, $L_0 = 10$ m, $\alpha = \pi/6$, $C_D = 0.0015$, $\rho_a = 1.2$ kg/m³, $\rho_w = 1025$ kg/m³, $\lambda = 532$ nm, $\vartheta = 6 \times 10^{-3}$, $h_0=0.1$ m, $\nu = 0.0001$ m²/s, 水平路径温盐比 $\omega = -2$ 。

3.1 大气湍流对光学参量影响的分析

图 3(a)展示了高斯光束在大气湍流下行传输过程中归一化 MCF 随 ρ 的变化规律。结果表明, 随着 ρ 的增大, MCF 呈单调递减趋势, 表明了光场空间相干性随其空间间隔距离的增大而逐渐减弱。湍流强度参数 q 对该衰减过程具有显著影响, 当 $q=0.1$ 时, MCF 衰减相对缓慢; 而当 $q=0.2$ 时, 相干性退化明显加速, 系统更早进入低相干极限。进一步将式(3)积分模型与文献 [20] 给出的近似模型结果进行对比可以发现, 本文提出的积分模型能够更加准确地反映大气湍流的非均匀空

间分布以及沿传播路径的累积效应。在小空间尺度区域 ($\rho < 20$ mm) 内, 积分模型揭示了湍流对光束相干性的强烈破坏作用, 而近似模型虽然能够给出整体衰减趋势, 但对相干性的预测偏低, 难以充分描述复杂湍流环境下相干退化的细节特征。仿真结果表明, 在典型链路条件下, 本文模型相较于近似模型可将空间相干性的预测偏差修正了约为 20%–30%, 从而显著提高远距离光传输系统性能评估的准确性。

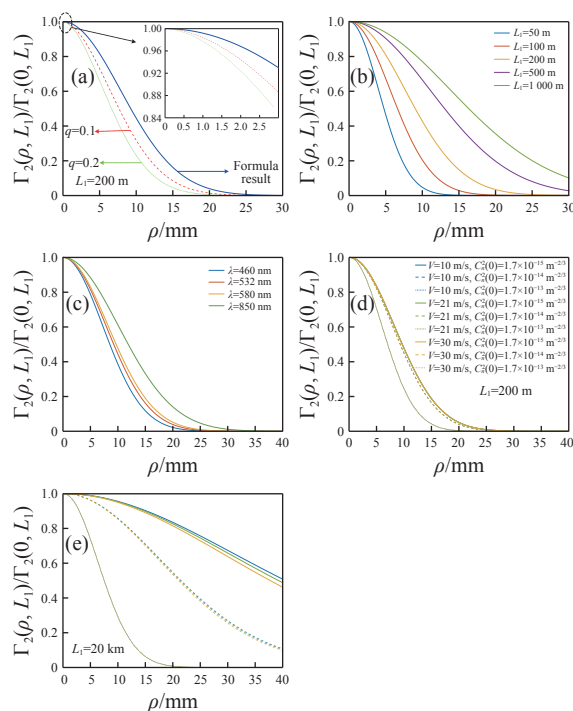


图 3 大气湍流下行传输中, 高斯光束在不同参数下的归一化互相干函数变化。(a) ρ ; (b) L_1 ; (c) λ ; (d) 和 (e) V 和 $C_n^2(0)$, $L_1=200$ m, $L_1=20$ km; (d) 和 (e) 共用图例

图 3(b)展示了归一化 MCF 随 L_1 的变化规律。随着 L_1 增加, 光束空间相干性逐渐降低。尤其是在近地表区域(如 50 m 和 100 m 附近), 湍流

强度明显增强,相干性衰减更加迅速。这一现象主要源于 Hufnagel-Valley 模型中近地面区域的 $C_n^2(h)$ 较大,从而导致更强的相位扰动累积效应。

图 3(c)给出了在不同 λ 下 MCF 的变化趋势。结果表明,随着 λ 增加,光束空间相干性逐渐增强,长波长光束(如 580 nm 和 850 nm)在湍流环境中的相干退化速率明显低于短波长光束(如 460 nm 和 532 nm)。这一规律本质上可以从 Kolmogorov 湍流理论得到解释:相干性衰减项中包含波数平方因子($k^2 \propto \lambda^{-2}$),波长越短,对湍流折射率扰动的敏感性越高,从而导致更强的相干性退化。

图 3(d)和(e)进一步分析了 V 及 $C_n^2(0)$ 对 MCF 的影响。结果表明,随着 V 或 $C_n^2(0)$ 的增加,光束空间相干性衰减更加明显。在近地面区域(如 $L_1=200$ m),湍流尤为显著,相干性退化速度明显加快,如图 3(d)所示。而当传播距离增大至高空区域(如 $L_1=20$ km)时,湍流强度逐渐降低,此时风速对湍流结构分布的调制作用反而更加突出^[18]。

如图 4 所示,高斯光束在大气湍流中下行传输时,波结构函数 $D(\rho, L_1)$ 均随 L_1 和 ρ 的增加而显著上升。尤其在较大 ρ 和 L_1 下呈现出明显的非线性增长特性。具体而言,当 $L_1 < 50$ m 时, $D(\rho, L_1)$ 增长较为缓慢,反映出大气湍流短距离内的累积效应有限;而当 $L_1 > 150$ m 后, $D(\rho, L_1)$ 出现急剧上升,揭示了大气湍流在光束长距离传输中对波前相干性的强烈破坏和显著累积效应。

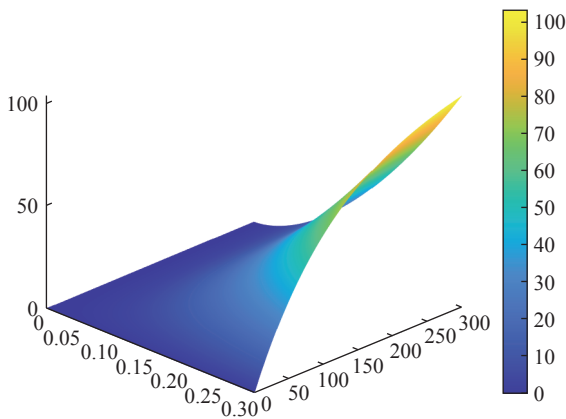


图 4 大气湍流下行传输中,波结构函数随传输距离和空间间隔的变化

Fig. 4 Variation of wave structure function with transmission distance and spatial separation for Gaussian beam propagating through atmospheric turbulence along slant paths.

3.2 气-海界面对光学参量影响的分析

图 5 展示了不同海面风速条件下海面波浪能量谱的分布特性。结果表明。随着风速 V' 由 5 m/s 逐渐增加至 20 m/s,波浪能量谱的主分布区域从高频逐步向低频方向迁移。同时,在较高风速条件下,能量谱分布范围明显扩展,覆盖更多低频区域,说明较强的风场促进了大尺度波浪结构的形成。从方向分布角度来看,波浪能量主要集中在 $[-90^\circ, 90^\circ]$ 特定范围内,并且随着 V' 增加,波浪能量在主导方向上的集中程度进一步增强。

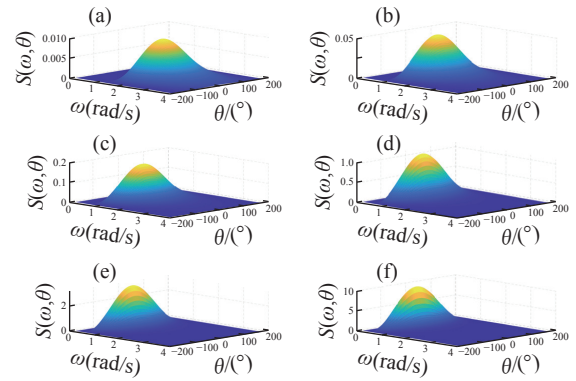


图 5 不同风速条件下海面波浪能量分布。(a) (b) (c) (d) (e) (f) 对应风速分别为 5、7、9、13、16、20 m/s

Fig. 5 Distribution of sea surface wave energy under various wind speed conditions. (a) (b) (c) (d) (e) (f) corresponding to wind speeds of $V' = 5, 7, 9, 13, 16, 20$ m/s

图 6 给出了气-海界面扰动条件下 MCF 随 ρ 的变化规律。结果显示,随着 V' 由 5m/s 增加至 20 m/s, MCF 衰减速率逐步减缓,空间相干长度显著增大。在低风速($V' = 5$ m/s)条件下,高频的海面扰动占主导地位,小尺度相位起伏较为剧烈,因此 MCF 在小空间尺度内迅速衰减;而在高风速($V' = 20$ m/s)条件下,海面波浪能量谱向低频迁移,大尺度扰动比例增加,统计平均效应对高频相位起伏产生抑制作用,从而使 MCF 曲线衰减趋势区域平缓。从物理机理上看,该现象源于海面波动功率谱中低频成分具有更大的空间相关尺度,从而增强了光场的相位扰动空间相关性,有利于维持较长的相干传播距离。值得注意的是,这一结论仅适用光束下行传输时,完全发展海况条件和统计平均意义下的扰动模式,在这些条件下,海面风速增大有助于低频扰动的增强,进而延缓相干性衰减。然而,在瞬时波前质量或强非线性界面扰动情形下,风速增大可能不会产生相同效

果。微弱扰动近似的 Rytov 理论同样表明, MCF 指数衰减系数与界面扰动谱强度密切相关, 而低频扰动对应更大的空间相关尺度, 因此有利于维持较高的空间相干性。

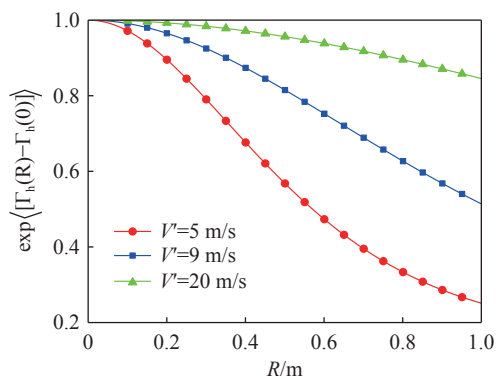


图 6 通过气-海界面传输时, 归一化互相干函数随海面风速变化

Fig. 6 Variation of normalized mutual coherence function with sea surface wind speed for transmission through the air-sea interface.

3.3 海洋湍流对光学参量影响的分析

图 7(a) 展示了高斯光束在海洋湍流中下行传输时, 斜程 PSORF 模型与近似模型^[20] 得到的归一化 MCF 随 ρ 的变化规律。两种模型在 $\rho=0$ 附近均接近 1, 表明近轴区域光场具有较高的一致性。随着 ρ 增大, 两种模型均表现出明显的相干性衰减趋势, 反映了海洋湍流对光束空间相干性的削弱作用。在 $\rho=5\sim 15\text{mm}$ 区间内, PSORF 模型预测的相干衰减速率明显慢于近似模型。这主要是因为 PSORF 模型引入了低频漩涡增强项以及温度-盐度耦合结构项, 同时考虑了湍流耗散率的影响, 从而更加准确地反映了海洋湍流多尺度结构的物理特性。随着 ρ 继续增大, MCF 迅速下降, 当 $\rho=15\sim 20\text{mm}$ 时, MCF 已降低至 0.1 以下, 表明在典型海洋湍流条件下光束空间相干性迅速消失。

图 7(b) 分析了不同 λ 和 $l_0=1\sim 10\text{mm}$ 条件下 MCF 的变化趋势。结果表明, 长 λ 光束(如 850 nm)对应的 MCF 值接近 0.498, 短 λ 光束(如 460 nm)对应的 MCF 值约为 0.496。相比之下, l_0 主要通过 $\exp[-(\kappa l_0)^2/R_j^2]$ 对结果进行修正, 其对整体相干性变化的贡献有限。因此, 在给定湍流参数范围内, 波长变化通过波数项影响湍流相位扰动强度, 从而对 MCF 的影响更加显著。

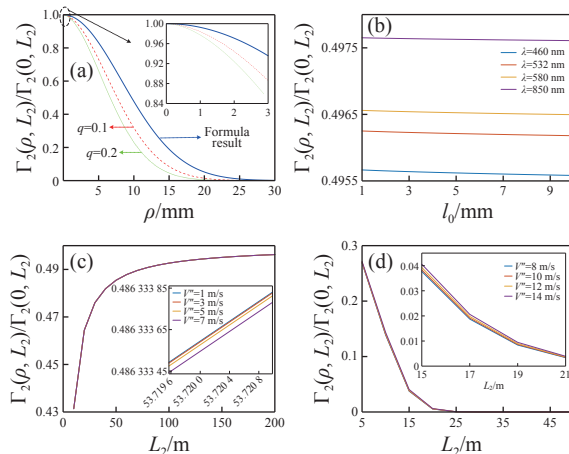


图 7 高斯光束通过海洋湍流下行传输时, 归一化互相干函数在不同参数下的变化。(a) ρ ; (b) λ ; (c) (d) 弱风与强风

Fig. 7 Variation of normalized mutual coherence function of Gaussian beam propagating downward through oceanic turbulence under various parameters. (a) ρ ; (b) α and L_0 ; (c) λ and ρ ; (d) (e) weak and strong wind, L_2

图 7(c) 和 (d) 进一步分析了海洋风速 $V''=1\sim 15\text{m/s}$ 以及 $L_2=50\sim 200\text{m}$ 条件下 MCF 的变化特征。结果表明, MCF 随风速变化呈现明显的分段特征。在弱风速区间 $V''=1\sim 7\text{m/s}$ 时, 随着 V'' 增加, MCF 由约 0.43 逐步提升至约 0.5; 而在强风速区间 $V''=7\sim 15\text{m/s}$ 时, MCF 则随 V'' 增加而逐步下降, 并整体低于弱风速区间水平。这一现象主要源于弱风与强风条件下采用的不同湍流模型结构, 其物理机制可归因于风速通过湍流耗散率调制折射率波动谱的空间分布。随着风速和传播距离进一步增加, 海洋湍流对光束相干性的破坏作用逐渐增强, 系统最终进入“低相干极限”状态, 表现出明显的湍流耗散特征。

需要指出的是, 在空海通信背景下, 波长对光束传播的影响不仅体现在湍流引起的相干性退化上, 还必须综合考虑海水的吸收和散射效应。虽然长波长光束(如 850 nm)在湍流条件下的相干性保持较好, 但值得注意的是, 450-580 nm 波段的蓝绿激光(如 460 nm)在海水中表现出较低的吸收和散射损耗、穿透能力最强, 此外, 该波段的光束也在大气中呈现“大气窗口”效应^[26], 使其在湍流大气条件下具有较好的传播特性。综合考虑这些因素, 蓝绿光在实际空海跨域光通信链路设计中具有重要的工程意义。

图 8 展示了高斯光束通过海洋湍流下行传输时,波结构函数随 L_2 与 ρ 的演变特性。结果表明,随着 L_2 与 ρ 的增加, $D(\rho, L_2)$ 均呈单调上升趋势,这与湍流导致波前相位扰动累积的物理机制一致。当 $L_2 < 5$ m 时, $D(\rho, L_2)$ 增长相对缓慢,表明海洋湍流扰动累积效应有限。当 $L_2 > 20$ m 时, $D(\rho, L_2)$ 呈现快速跃升,表现出明显的非线性积累特性。同时,较大的 ρ 会进一步放大相位扰动差异,从而加剧空间相干性的退化。在浅海层区域,由于风速驱动湍流占主导作用, $D(\rho, L_2)$ 对 ρ 和 L_2 的变化更加敏感,反映出海洋近表层扰动对空间相干退化的重要作用。

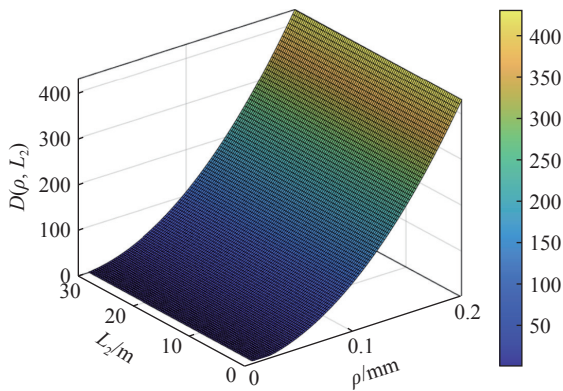


图 8 高斯光束通过海洋湍流下行传输时,波结构函数随空间间隔在不同传播距离下的变化

Fig. 8 Variation of wave structure function with spatial separation for Gaussian beam propagating downward through oceanic turbulence at different propagation distances.

最后,结合图 3(a)与图 7(a)的对比结果可以看出,本文提出的 MCF 与 WSF 模型能够更加准确地描述空海跨域传输过程中光束空间相干性的演化规律。该分段积分建模框架突破了传统单扰动源独立分析的局限,为多源耦合环境下光束空间相干性演化的统一描述提供了理论基础,并为空海跨域光通信系统的链路优化与稳健设计提供了新的分析方法。

参考文献:

- [1] 商志刚,张红玉,刘松佐,等.空海跨域通信研究现状与发展趋势[J].*水下无人系统学报*,2024,32(4):592-610.
SHANG ZH G, ZHANG H Y, LIU S Z, *et al.*. Research progress and development trend of air-sea cross-domain communication[J]. *Journal of Unmanned Undersea Systems*, 2024, 32(4): 592-610. (in Chinese).
- [2] 陈纯毅,杨华民,任斌,等.激光大气湍流传输数值实验建模与计算机模拟[J].*系统仿真学报*,2018,30(6):2133-2143.

4 结 论

本文建立了适用于大气-海洋跨域复杂湍流环境的高斯光束空间相干性理论模型,并通过数值仿真系统分析了光束在大气湍流、气-海界面及海洋湍流多层介质中的相干性演化规律。结果表明,在空对海跨域传输过程中,光束空间相干性随接收面两点间距的增大而单调衰减,其衰减速率受到湍流强度、传播路径长度、天顶角、波长以及环境动力学参数等多因素的耦合影响。在大气湍流环境中,随着传播距离和天顶角的增大,湍流累积效应显著增强,导致光束空间相干性加速下降;同时,波长对光束的相干性具有明显调制作用,短波长光束(如 460 nm、532 nm)对湍流扰动更为敏感,而较长波长(如 580 nm、850 nm)在相同条件下能够保持相对较高的空间相干性。在气-海界面扰动过程中,海面风速的增加会改变界面扰动能量谱分布,使低频成分逐渐占主导,高频扰动受到抑制,从而在统计平均意义上减缓光束空间相干性的衰减。在海洋湍流环境中,温度-盐度耦合结构及流速变化对光束传播产生显著影响,其中较强风速和较大温盐梯度会增强湍流耗散过程,加剧空间相干性的损失,而较弱风速条件则更有利于相干性的保持。综合分析表明,大气湍流在远距离跨域链路中主导光束相干性的整体退化过程;气-海界面扰动在一定的较高风速条件下表现出低频补偿效应;海洋湍流中的温盐耦合机制则进一步增强复杂环境下的相干性损耗。与现有近似模型相比,本文提出的多尺度复合扰动分段积分模型能够更准确地描述多源湍流扰动的级联效应,在典型链路条件下可将空间相干性近似偏差修正约为 20%–30%。上述研究揭示了多尺度、多物理场耦合作用下光束空间相干性的演化机制,为空对海光通信链路的参数优化与系统稳健设计提供了重要的理论依据。

- CHEN CH Y, YANG H M, REN B, *et al.*. Modeling and computer simulation of numerical experiments on laser propagation through atmospheric turbulence[J]. *Journal of System Simulation*, 2018, 30(6): 2133-2143. (in Chinese).
- [3] 柯熙政, 邓莉君. 无线光通信[M]. 北京: 科学出版社, 2016: 8, 103, 145-148.
- KE X ZH, DENG L J. *Wireless Optical Communication*[M]. Beijing: Science Press, 2016: 8, 103, 145-148. (in Chinese)(**查阅网上资料, 未找到对应的英文翻译, 请确认**).
- [4] 饶瑞中. 现代大气光学[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 370.
- RAO R ZH. *Modern Atmospheric Optics*[M]. Beijing: Science Press, 2012: 370. (in Chinese)(**查阅网上资料, 未找到对应的英文翻译, 请确认**).
- [5] 张凡, 罗江华, 李军, 等. 光束跨波动水空界面传输的表征与验证[J]. *中国激光*, 2023, 50(19): 1905001.
- ZHANG F, LUO J H, LI J, *et al.*. Characterization and validation of beam transmission through wavy water-to-air surface[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 50(19): 1905001. (in Chinese).
- [6] 陈纯毅, 杨华民, 姜会林, 等. 大气光通信中大气湍流影响抑制技术研究进展[J]. *兵工学报*, 2009, 30(6): 779-791.
- CHEN CH Y, YANG H M, JIANG H L, *et al.*. Research progress of mitigation technologies of turbulence effects in atmospheric optical communication[J]. *Acta Armamentarii*, 2009, 30(6): 779-791. (in Chinese).
- [7] CHEN CH Y, YANG H M, KAVEHRAD M, *et al.*. Validity of quadratic two-source spherical wave structure functions in analysis of beam propagation through generalized atmospheric turbulence[J]. *Optics Communications*, 2014, 332: 343-349.
- [8] CHEN CH Y, YANG H M, TONG SH F, *et al.*. Two-frequency mutual coherence function for Gaussian-beam pulses propagating along a horizontal path in weak anisotropic atmospheric turbulence[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(18): 5797-5804.
- [9] CHEN CH Y, YANG H M. 5-DoF-transformation-based statistical characterization of optical-wave fluctuations arising from propagation in atmospheric turbulence with arbitrarily orientated anisotropy ellipsoids[J]. *Optics Express*, 2025, 33(4): 8445-8467.
- [10] 侯政诚, 张明明, 白胜闯, 等. 一维阵列涡旋光束在海面大气中的传输特性[J]. *中国光学(中英文)*, 2024, 17(2): 300-311.
- HOU ZH CH, ZHANG M M, BAI SH CH, *et al.*. Propagation properties of one-dimensional array vortex beams in a marine atmosphere[J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(2): 300-311. (in Chinese).
- [11] 杨慧哲, 张贞钰, 刘进, 等. 基于投影光瞳分布的星地激光通信波前探测[J]. *光学精密工程*, 2024, 32(7): 945-955.
- YANG H ZH, ZHANG ZH Y, LIU J, *et al.*. Wavefront sensing for FSO systems based on projected pupil plane pattern[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2024, 32(7): 945-955. (in Chinese).
- [12] 李辉, 姜岩, 赵义武, 等. 空间分集光密钥生成的信道相关性影响[J]. *光学精密工程*, 2024, 32(13): 2128-2140.
- LI H, LOU Y, ZHAO Y W, *et al.*. Channel correlation impact on spatial diversity optical key generation[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2024, 32(13): 2128-2140. (in Chinese).
- [13] KOROTKOVA O, FARWELL N. Effect of oceanic turbulence on polarization of stochastic beams[J]. *Optics Communications*, 2011, 284(7): 1740-1746.
- [14] FARWELL N, KOROTKOVA O. Intensity and coherence properties of light in oceanic turbulence[J]. *Optics Communications*, 2012, 285(6): 872-875.
- [15] ATA Y, BAYKAL Y. Structure functions for optical wave propagation in underwater medium[J]. *Waves in Random and Complex Media*, 2014, 24(2): 164-173.
- [16] LU L, JI X L, LI X Q, *et al.*. Influence of oceanic turbulence on propagation characteristics of Gaussian array beams[J]. *Optik*, 2014, 125(24): 7154-7161.
- [17] 卢腾飞, 张凯宁, 吴志军, 等. 椭圆涡旋光束在海洋湍流中的传输特性[J]. *中国光学*, 2020, 13(2): 323-332.
- LU T F, ZHANG K N, WU ZH J, *et al.*. Propagation properties of elliptical vortex beams in turbulent ocean[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(2): 323-332. (in Chinese).
- [18] YU B, CHEN CH Y, MENG F J. Wave structure function and spatial coherence radius of plane waves propagating through atmospheric and oceanic turbulence[J]. *Proceedings of SPIE*, 2025, 13564: 8-13.
- [19] 于波, 陈纯毅, 孟凡军, 等. 空海跨域通信双波模型传输相干统计特性研究[J]. *应用光学*, 2025, 46(6): 1471-1479.
- YU B, CHEN CH Y, MENG F J, *et al.*. Coherent statistical characteristics of two-wave model for air-sea cross-domain communication transmission[J]. *Journal of Applied Optics*, 2025, 46(6): 1471-1479. (in Chinese).

- [20] ANDREWS L C, PHILLIPS R L. *Laser Beam Propagation Through Random Media* [M]. 2nd ed. Bellingham: SPIE, 2005.
- [21] PIERSON JR W J, MOSKOWITZ L. A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of S. A. Kitaigorodskii [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1964, 69(24): 5181-5190.
- [22] 侯学隆, 黄启来, 沈培志. 基于 FFT 的海浪实时仿真方法 [J]. *计算机工程*, 2009, 35(22): 256-258, 261.
HOU X L, HUANG Q L, SHEN P ZH. Ocean wave real-time simulation method based on FFT [J]. *Computer Engineering*, 2009, 35(22): 256-258, 261. (in Chinese).
- [23] LI Y, LI B L, JIANG H L. Displacements of a spatially limited light beam in the slant path of oceanic turbulence [J]. *Optics Express*, 2022, 30(14): 24232-24244.
- [24] BOWERS D G, SIMPSON J H. Mean position of tidal fronts in European-shelf seas [J]. *Continental Shelf Research*, 1987, 7(1): 35-44.
- [25] BOGUCKI D J, HUGUENARD K, HAUS B K, *et al.*. Scaling laws for the upper ocean temperature dissipation rate [J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42(3): 839-846.
- [26] DUNTLEY S Q. Light in the Sea [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1963, 53(2): 214-233.

作者简介:



于波(1990—),女,内蒙古通辽人,博士生,讲师,主要从事光传输建模与仿真和计算机应用方面的研究。主要学习经历:2008.09-2013.06,长江师范学院,物理学专业,学士;2013.09-2014.06,北京邮电大学;2014.09-2017.06,暨南大学,光通信与光传感(光学工程)专业,硕士研究生;2023.09-至今,长春理工大学,计算机科学技术学院,博士在读。E-mail: 2023200165@mails.cust.edu.cn



孟凡军(1969—),男,吉林长春人,正高级工程师,博士生导师,主要从事先进制造基础研究、预先研究及工程化应用方面的研究。主要学习经历:1988.09-1992.07,太原机械学院,自动控制系计算机及应用专业,学士。E-mail: 2022800001@cust.edu.cn