

空海跨域通信双波模型传输相干统计特性研究

于波 陈纯毅 孟凡军 李琼 张振忠

Coherent statistical characteristics of two-wave model for air-sea cross-domain communication transmission

YU Bo, CHEN Chunyi, MENG Fanjun, LI Qiong, ZHANG Zhenzhong

引用本文:

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. DOI: 10.5768/JAO202546.0608002

YU Bo, CHEN Chunyi, MENG Fanjun, 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. DOI: 10.5768/JAO202546.0608002

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0608002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于MIMO的无人机斜程激光通信性能分析

Laser communication performance of UAV slant based on MIMO

应用光学. 2022, 43(5): 1030–1036 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0508006>

小型化长出瞳距激光通信接收望远镜光学设计

Optical design of miniaturized laser communication receiving telescope with long exit pupil distance

应用光学. 2023, 44(5): 975–981 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0501005>

基于复合相位屏的光传输多孔径接收特性研究

Research on multi-aperture receiving characteristics of optical transmission based on composite phase plate

应用光学. 2024, 45(5): 1085–1094 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0508002>

采用分区法生成稀疏谱湍流相位屏

Generation of sparse spectrum turbulence phase screen by partition allocation method

应用光学. 2020, 41(3): 523–530 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0302006>

低轨星地激光通信地面跟踪架研制与验证

Development and validation of low-orbit satellite-ground laser communication tracking mount

应用光学. 2025, 46(4): 717–724, 936 <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0401002>

基于空间光调制器的MIMO大气传输特性研究

MIMO atmospheric transmission characteristics based on spatial light modulator

应用光学. 2022, 43(3): 544–550 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0308001>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2025) 06-1471-09

引用格式: 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 Bo, CHEN Chunyi, MENG Fanjun, 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.



在线阅读

空海跨域通信双波模型传输相干统计特性研究

于波, 陈纯毅, 孟凡军, 李琼, 张振忠

(长春理工大学 计算机科学技术学院, 吉林 长春 130022)

摘要: 空中与海洋之间激光通信和数据传输技术需求增长迅速, 亟须研究稳健可靠的空海跨域通信技术。通过采用 Rytov 近似理论对平面波和球面波双波模型在空海跨域混合信道下行链路传输进行分析, 推导出波结构函数、空间相干长度及空间相干函数的解析公式, 并结合数值仿真进行验证。研究揭示了双波模型光束在大气和海洋复杂湍流介质中传输的相干统计特性, 发现了大气湍流中的波结构函数 Kolmogorov 三分之五幂律在海洋湍流的惯性范围适应性, 并进一步探讨了双波模型在大气湍流和海洋湍流传输过程中的波结构函数、空间相干长度和空间相干函数的变化规律。该研究为激光在空海跨域传输中高可靠性的相干探测提供了重要的理论依据和技术支撑。

关键词: 激光通信; 空间相干函数; 波结构函数; 空间相干长度; 双波模型; 光学湍流

中图分类号: TN929.1

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202546.0608002

Coherent statistical characteristics of two-wave model for air-sea cross-domain communication transmission

YU Bo, CHEN Chunyi, MENG Fanjun, LI Qiong, ZHANG Zhenzhong

(School of Computer Science and Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: The demand for laser communication and data transmission technology between atmosphere and ocean is rapidly increasing, necessitating robust and reliable air-sea cross-domain communication technologies. By deriving analytical formulas for the wave structure function, spatial coherence length, and spatial coherence function, this work analyzes the downlink transmission of plane wave and spherical wave two-wave model for air-sea cross-domain mixed channel using the Rytov approximation method. Numerical simulations are conducted to validate these findings. This work reveals the coherence characteristics of two-wave model beams during transmission through complex and weak turbulent media in the atmosphere and ocean. It is found that the Kolmogorov five-thirds power law of wave structure functions in atmospheric turbulence is adaptable to the inertial range of oceanic turbulence. Furthermore, this work explores the variations of wave structure function, spatial coherence length, and spatial coherence function for plane wave and spherical wave during transmission through atmospheric and oceanic turbulence. This work provides important theoretical guidance and technical support for coherent detection of the robustness and reliability of laser transmission for air-sea

收稿日期: 2024-12-06; 修回日期: 2025-02-26

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 (JJKH20250528BS)

第一作者: 于波, E-mail: 2023200165@mails.cust.edu.cn

通信作者: 陈纯毅, E-mail: chenchunyi@hotmail.com

孟凡军, E-mail: 2022800001@cust.edu.cn

cross-domain communication.

Key words: laser communication; spatial coherence function; wave structure function; spatial coherence length; two-wave model; optical turbulence

引言

近年来,空中与海洋之间激光通信需求增长迅速,尤其是在空中海洋跨域作战、海洋物联网以及海洋环境侦察勘探等方面有着广泛的应用^[1],促使了研究人员对于空海跨域通信的关注日益增加。激光光束在通过大气湍流和海洋湍流介质传输到达接收端时,其统计特性在决定相关系统的性能中起到关键性作用。然而,由于大气和海水介质的复杂性以及恶劣环境的影响,空海跨域通信信道表现出显著的复杂性。当激光光束在大气-海水混合信道下行链路传输时,激光的相干性受到严重破坏。互相干函数是描述光束经光学湍流传播的基本物理量,基于该函数可以进一步推导出光波的统计特性,如相干带宽。目前,关于大气湍流的理论研究相对成熟,已有多种方法用于确定激光光束通过大气湍流介质的传输特性^[2-8]。然而,由于海洋湍流的复杂性,激光光束在海洋湍流中的传输研究相较于大气湍流中较为匮乏^[9-10]。更为重要的是,同时研究大气湍流与海洋湍流对光传输影响的报道仍然较少,因此,深入探讨激光在跨域传输过程中的湍流效应,尤其是大气与海洋湍流对光传输特性的影响具有重要的研究意义。

目前,空海跨域信道光传输理论研究主要集中在大气湍流影响,关于海洋湍流传输信道的研究相对较少。海洋环境的复杂性及传输距离等因素导致的光衰减问题,使得空海跨域通信的研究面临巨大的挑战。

采用平面波和球面波双波模型,结合已有的大气传输理论以及海洋湍流折射率功率谱,构建了适用于空海跨域光传输的混合信道湍流模型。该模型能够描述双波模型光束在大气和海洋两种湍流介质中的传输过程,包括波结构函数、空间相干长度及二阶特性互相干函数等,并通过数值仿真验证了该模型的有效性。研究结果表明,在给定的大气和海洋条件下,该方法能够定量计算空海跨域传输的相干统计特性。

1 光束经湍流大气传输的相干模型

在跨空海域光传输建模过程中,空海界面对光

束的反射与折射效应是不可忽视的,然而,本文研究的重点在于湍流主导下的相干特性,因此在模型构建中暂未显式纳入空海界面反射与折射效应,而是将重心放在大气与海洋湍流对传输特性的影响。基于此假设,首先构建双波模型光束经湍流大气传输的相干模型。

图 1 为平面波和球面波双波模型空海跨域传输几何结构的示意图。假设一个平面波或球面波从源平面(即 $x-o-y$ 平面)沿着一条垂直路径经由大气湍流、海平面和海洋湍流传播到观察平面。大气湍流存在于源平面和海平面之间,海洋湍流存在于海平面和接收平面之间。

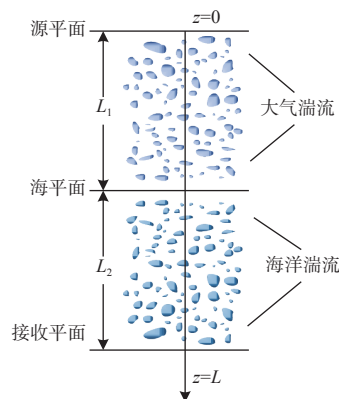


图 1 平面波和球面波的传播路径

Fig. 1 Propagation path of plane wave and spherical wave

在 Rytov 近似理论下,双波模型光束通过湍流大气介质传输,垂直于传播方向 $z = L_1$ 平面内的波结构函数直接采用与折射率结构函数关联^[11]的形式:

$$D(\rho_1, L_1) = 2(2\pi k)^2 \int_0^{L_1} dz \int_0^\infty [1 - J_0(\kappa \rho_1)] \cdot \Phi_n^{(1)}(\kappa) \kappa d\kappa \quad (1)$$

式中:波数 $k = 2\pi/\lambda$, λ 为光束波长; L_1 为光波通过大气湍流介质的传输距离; $J_0(\kappa \rho_1)$ 为零阶贝塞尔函数; $\Phi_n^{(1)}(\kappa)$ 为大气湍流功率谱; κ 为空间波数; ρ_1 为空间间隔距离。对于 Kolmogorov 湍流谱,假设在传输路径上,湍流谱具有相同的形式,只是湍流强度发生变化,则有:^[11]

$$\Phi_n^{(1)}(\kappa) = 0.033 C_n^2 \kappa^{-11/3} f(\kappa l_0) \quad (2)$$

式中: C_n^2 为大气湍流折射率结构常数; l_0 为 Kolmogorov 湍流的最小尺度; $f(\kappa l_0)$ 为修正函数。采用目前应用最广泛的 Hufnagel-Valley 廓线模型, C_n^2 可以表示为^[12]

$$C_n^2(h) = 8.148 \times 10^{-56} V^2 h^{10} \exp^{-h} + 2.7 \times 10^{-16} \exp^{-h/1500} + C_0^2 \exp^{-h/100} \quad (3)$$

式中: h 是距离地面高度, 单位为 m; 垂直路径均方根风速 $V = 21 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; C_0^2 为地面附近大气结构常数, 典型值为 $1.7 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ 。

将式 (2) 和式 (3) 代入到式 (1) 中, 在旁轴近似条件下, 零阶贝塞尔函数的二阶近似 $J_0(\kappa \rho_1) \approx 1 - (\kappa \rho_1)^2 / 4$ ^[6], 平面波通过大气湍流介质传输的波结构函数为

$$D_{\text{pl}}(\rho_1, L_1) = \begin{cases} 1.9542k^2 l_0^{-1/3} \rho_1^2 \int_0^{L_1} C_n^2(z) dz, & \rho_1 \ll l_0 \\ 2.9143k^2 \rho_1^{5/3} \int_0^{L_1} C_n^2(z) dz, & \rho_1 \gg l_0 \end{cases} \quad (4)$$

扩展到球面波, 对球面波作式 (2) 假设, 球面波的波结构函数为

$$D_{\text{sp}}(\rho_1, L_1) = \begin{cases} 1.9542k^2 l_0^{-1/3} \rho_1^2 \int_0^{L_1} C_n^2(z) (z/L_1) dz, & \rho_1 \ll l_0 \\ 2.9143k^2 \rho_1^{5/3} \int_0^{L_1} C_n^2(z) (z/L_1)^{5/3} dz, & \rho_1 \gg l_0 \end{cases} \quad (5)$$

光场的二阶矩定义为相干函数, 为简化计算, 假设 $z = L_1 = 0$ 处光强为单位值, 且完全相干, 对 $\Gamma(\rho, L)$ 进行归一化处理后, 垂直于光传输方向的平面内的相干函数^[11]为

$$\Gamma(\rho, L) = \exp \left[-\frac{1}{2} D(\rho, L) \right] \quad (6)$$

归一化相干函数 $\Gamma(\rho, L) = \exp^{-1}$ 的距离为空间相干长度 ρ_0 。在大气湍流介质 Kolmogorov 湍流起伏条件下, 空间相干长度大于等于湍流内尺度 l_0 ^[11]。因此, 平面波和球面波的空间相干长度 $\rho_{\text{opl}}^{(1)}$ 和 $\rho_{\text{osp}}^{(1)}$ 分别为

$$\rho_{\text{opl}}^{(1)} = \left[1.4572k^2 \int_0^{L_1} C_n^2(z) dz \right]^{-3/5}, \quad \rho_0 \gg l_0 \quad (7)$$

$$\rho_{\text{osp}}^{(1)} = \left[1.4572k^2 \int_0^{L_1} C_n^2(z) (z/L_1) dz \right]^{-3/5}, \quad \rho_0 \gg l_0 \quad (8)$$

由此, 式 (4) 和式 (5) 确定双波模型光束通过大气湍流介质的波结构函数^[11]可以描述为

$$D(\rho_1, L_1) = 2 \left(\frac{\rho_1}{\rho_0^{(1)}} \right)^{5/3}, \quad \rho_1 \gg l_0 \quad (9)$$

式中 $\rho_0^{(1)}$ 为双波模型在大气湍流介质中传输的空间相干长度。实际上, 在研究激光束经光学湍流介质的传输特性时, 空间相干长度常采用 Fried 参数 r_0 , 且 $r_0 = 2.1\rho_0^{(1)}$, 则波结构函数^[11]可表示为

$$D(\rho_1, L_1) = 6.88 \left(\frac{\rho_1}{r_0} \right)^{5/3}, \quad \rho_1 \gg l_0 \quad (10)$$

2 光束经海洋湍流传输的相干模型

为了简化分析和模型构建, 假设海水为均匀的无漂浮物介质。海水折射率的随机波动与激光光束在海洋湍流传输过程中海水温度以及盐度的波动密切相关。基于折射率的随机波动海洋折射率功率谱可表示为^[13]

$$\Phi_n^{(2)}(\kappa) = 0.388 \times 10^{-8} \varepsilon^{-1/3} \kappa^{-11/3} \left[1 + 2.35(\kappa \eta)^{2/3} \right] \cdot \frac{\chi_T}{\tau^2} \left(\tau^2 \exp^{-A_T \delta} + \exp^{-A_S \delta} - 2\tau \exp^{-A_{TS} \delta} \right) \quad (11)$$

式中: ε 为单位体积流体质量的湍动能耗散率, 典型取值范围为 $10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-3} \sim 10^{-1} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$; η 代表海洋湍流的最小尺度, 取值与大气湍流内尺度 l_0 相同; χ_T 为温度的均方耗散率, 典型取值范围为 $10^{-10} \text{ K}^2 \cdot \text{s}^{-1} \sim 10^{-4} \text{ K}^2 \cdot \text{s}^{-1}$; τ 为温盐比, 其取值范围为 $[-5, 0]$, -5 和 0 分别是温度和盐度变化引起的光学湍流^[13]; $A_T = 1.863 \times 10^{-2}$; $A_S = 1.9 \times 10^{-4}$; $A_{TS} = 9.41 \times 10^{-3}$; $\delta = 8.284(\kappa \eta)^{4/3} + 12.978(\kappa \eta)^2$ 。

海洋湍流中波结构函数采用大气湍流环境中相同的表达式^[11]:

$$D(\rho_2, L_2) = 8\pi^2 k^2 L_2 \int_0^\infty [1 - J_0(\kappa \rho_2)] \Phi_n^{(2)}(\kappa) \kappa d\kappa \quad (12)$$

式中: L_2 为光束在海洋湍流中的传输距离; ρ_2 为空间间隔距离。将零阶贝塞尔函数级数展开, 海洋湍流中平面波波结构函数可表示为

$$D_{\text{pl}}(\rho_2, L_2) = 8\pi^2 k^2 \left(0.388 \times 10^{-8} \right) \varepsilon^{-1/3} \frac{\chi_T}{\tau^2} \sum_{n=1}^\infty \frac{(-1)^{n-1} \rho_2^{2n}}{(n!)^2 2^{2n}} \cdot \int_0^\infty \kappa^{2n-8/3} \left[1 + 2.35\eta^{2/3} \kappa^{2/3} \right] \left(\tau^2 \exp^{-8.284A_S \eta^{4/3} \kappa^{4/3} - 12.978A_S \eta^2 \kappa^2} + \exp^{-8.284A_S \eta^{4/3} \kappa^{4/3} - 12.978A_S \eta^2 \kappa^2} - 2\tau \exp^{-8.284A_{TS} \eta^{4/3} \kappa^{4/3} - 12.978A_{TS} \eta^2 \kappa^2} \right) d\kappa \quad (13)$$

接下来, 利用物流超几何的定义和性质, 得到平面波在海洋湍流中的波结构函数 $D_{\text{pl}}(\rho_2, L_2)$ 为

$$D_{\text{pl}}(\rho_2, L_2) \approx \begin{cases} 3.603 \times 10^{-7} k^2 L_2 \varepsilon^{-1/3} \frac{\chi_T}{\tau^2} \rho_2^2 (16.958\tau^2 - 44.175\tau + 118.923), & \rho_2 \ll \eta \\ 3.603 \times 10^{-7} k^2 L_2 \varepsilon^{-1/3} \frac{\chi_T}{\tau^2} \rho_2^{5/3} (1.116\tau^2 - 0.838\tau + 0.419), & \rho_2 \gg \eta \end{cases} \quad (14)$$

在 Rytov 近似条件下, 通过各向同性均匀的海洋湍流的球面波的波结构函数^[14] 定义如下:

$$D_{\text{sp}}(\rho_2, L_2) = 8\pi^2 k^2 L_2 \int_0^\infty [1 - J_0(\kappa \xi \rho_2)] \Phi_n^{(2)}(\kappa) \kappa d\kappa d\xi \quad (15)$$

同样地, 通过海洋湍流的球面波的波结构函数为

$$D_{\text{sp}}(\rho_2, L_2) \approx \begin{cases} 3.603 \times 10^{-7} k^2 L_2 \varepsilon^{-1/3} \frac{\chi_T}{\tau^2} \rho_2^2 (5.623\tau^2 - 14.725\tau + 39.641), & \rho_2 \ll \eta \\ 3.603 \times 10^{-7} k^2 L_2 \varepsilon^{-1/3} \frac{\chi_T}{\tau^2} \rho_2^{5/3} (0.419\tau^2 - 0.838\tau + 0.419), & \rho_2 \gg \eta \end{cases} \quad (16)$$

同样地, 利用归一化的相干函数 $\Gamma(\rho, L) = \exp^{-1}$ 的距离为空间相干长度, 依据式 (14) 和式 (16) 得到海洋湍流中双波模型的空间相干长度 $\rho_{\text{opl}}^{(2)}$ 和 $\rho_{\text{osp}}^{(2)}$ 分别为

$$\rho_{\text{opl}}^{(2)} \approx \begin{cases} \left[3.603 \times 10^{-7} k^2 L_2 \varepsilon^{-1/3} \frac{\chi_T}{\tau^2} (16.958\tau^2 - 44.175\tau + 118.923) \right]^{-1/2}, & \rho_0 \ll \eta \\ \left[3.603 \times 10^{-7} k^2 L_2 \varepsilon^{-1/3} \frac{\chi_T}{\tau^2} (1.116\tau^2 - 2.235\tau + 1.119) \right]^{-3/5}, & \rho_0 \gg \eta \end{cases} \quad (17)$$

$$\rho_{\text{osp}}^{(2)} \approx \begin{cases} \left[3.603 \times 10^{-7} k^2 L_2 \varepsilon^{-1/3} \frac{\chi_T}{\tau^2} (5.623\tau^2 - 14.725\tau + 39.641) \right]^{-1/2}, & \rho_0 \ll \eta \\ \left[3.603 \times 10^{-7} k^2 L_2 \varepsilon^{-1/3} \frac{\chi_T}{\tau^2} (0.419\tau^2 - 0.838\tau + 0.419) \right]^{-3/5}, & \rho_0 \gg \eta \end{cases} \quad (18)$$

此结果与文献 [15] 形式相符。由式 (14)、式 (15)、式 (17) 和式 (18) 得到海洋湍流中双波模型的波结构函数为

$$D(\rho_2, L_2) = \begin{cases} 2(\rho_2/\rho_0^{(2)})^2, & \rho_2 \ll \eta \\ 2(\rho_2/\rho_0^{(2)})^{5/3}, & \rho_2 \gg \eta \end{cases} \quad (19)$$

此结果与文献 [11] 结果相符。发现采用文献 [13] 提出的海洋湍流功率谱 Kolmogorov 三分之五幂律的波结构函数在海洋湍流的惯性范围内同样成立。

激光在大气湍流、空海界面和海洋湍流中传输时, 会产生一系列复杂的湍流效应, 如光束扩展、光束抖动和强度起伏等。这些效应会显著影响光束质量, 特别是在长距离传输或跨域通信中。因此, 深入理解和分析这些湍流效应, 对优化实际激光通信系统至关重要。本文提出的双波模型为大气湍流和海洋湍流中激光传输的波结构函数和空间相干长度提供了解析表达式。该模型为

后续研究激光在光学湍流中的传输特性、相干性变化等问题提供了理论基础和解析方法。大气湍流和海洋湍流对光的相干性有重要影响, 尤其是空海跨域通信中。深入探讨光束的相干性, 特别是空间相干长度这一关键参数, 作为波结构函数的唯一参量, 在光学湍流强度评估和光传输相位校正技术中具有广泛应用。需要指出的是, 海平面上的细尺度随机水波起伏对光波前产生附加扰动, 从而进一步改变光波的空间相干性。但这一部分并非本文研究的重点, 因此在模型中未予以显式考虑, 为未来研究提供了扩展方向。这一研究为未来在复杂湍流环境下的激光通信系统设计提供了理论指导。在未来的研究中, 也将引入更多的实验, 来验证海水漂浮物对光传输的具体影响。

3 数值仿真与分析

波长为 450 nm~580 nm 的蓝绿激光在海水信道中传播时穿透能力强, 且蓝绿激光在湍流大气

信道中传播时也具有“大气窗口”效应^[16]。故选取波长为 532 nm 的蓝绿光作为信号光。平面波和球面波双波模型经大气湍流和海洋湍流环境的传输距离 L_1 和 L_2 分别设置为 20 m、50 m、100 m 和 200 m, 温度盐度比 τ 为 -4, 大气和海洋湍流内尺度 l_0 和 η 均取值为 5×10^{-3} m。

为了确定平面波经大气湍流和海洋湍流介质传输的波结构函数, 绘制了平面波在大气湍流和海洋湍流介质中传输不同传输距离, 波结构函数随空间间隔变化的关系曲线, 如图 2 所示。图 2 (a) 展示了平面波通过大气湍流介质传输距离 L_1 分别为 20 m、50 m、100 m 和 200 m, 波结构函数 $D_{pl}(\rho_1, L_1)$ 随空间间隔距离 ρ_1 增加的变化。随着空间分隔距离 ρ_1 增大, 波结构函数 $D_{pl}(\rho_1, L_1)$ 单调递增, 表明大气湍流使得波前相干性逐渐减弱。在相同的空间间隔距离下, 平面波通过大气湍流传输距离 L_1 越大, $D_{pl}(\rho_1, L_1)$ 的数值越大, 表明大气湍流效应对更长传输距离的波

前影响更显著。当 $L_1 = 20$ m, ρ_1 从湍流内尺度 $l_0 = 5$ mm 增加到 50 mm 时, $D_{pl}(\rho_1, L_1)$ 从 0.0 088 增加至 0.4 077, 变化较小; 而当 $L_1 = 200$ m, 在相同的 ρ_1 范围内 $D_{pl}(\rho_1, L_1)$ 从 0.0 806 增至 3.7 403。由此可得, 传输距离越大, 波结构函数增长越快。当 $\rho_1 = 30$ mm, $L_1 = 20$ m 处的 $D_{pl}(\rho_1, L_1)$ 为 0.1 740, 而 $L_1 = 200$ m 处的 $D_{pl}(\rho_1, L_1)$ 则接近 1.5 965, 显示出传输距离增加对湍流影响的放大作用。这是因为平面波经过大气湍流后波前相位的起伏, 传输距离越长, 湍流对波的影响就越大, 因此波结构函数随传输距离增大而增大。

图 2 (b) 展示了平面波经海洋湍流介质传输距离 L_2 分别为 20 m、50 m、100 m 和 200 m, 平面波波结构函数 $D_{pl}(\rho_2, L_2)$ 随空间间隔距离 ρ_2 增加的变化。与图 2 (a) 类似, $D_{pl}(\rho_2, L_2)$ 随着 ρ_2 增加而单调递增, 且传输距离 L_2 越大, $D_{pl}(\rho_2, L_2)$ 的数值也越大, 表明平面波通过海洋湍流传输距离越长, 波前受到海洋湍流的扰动越强烈。当 $L_2 = 20$ m, 在 $\rho_2 = \eta = 5$ mm 增至 $\rho_2 = 50$ mm 时, $D_{pl}(\rho_2, L_2)$ 从 0.9 220 增大到 42.7 947; 而当 $L_2 = 200$ m, 在 $\rho_2 = \eta = 5$ mm 增至 $\rho_2 = 50$ mm 时, $D_{pl}(\rho_2, L_2)$ 从 9.2 198 迅速增至 427.9 474。这显示出海洋湍流强度在长距离传输下对波结构函数的显著影响。当 $\rho_2 = 30$ mm, $L_2 = 20$ m 处的 $D_{pl}(\rho_1, L_1)$ 为 40.2 454, 而 $L_2 = 200$ m 处的 $D_{pl}(\rho_2, L_2)$ 为 402.4 540, 这显示出传输距离增加对海洋湍流影响的放大作用。

图 2 (a) 与图 2 (b) 均展示了平面波通过大气湍流和海洋湍流介质传输时, 波结构函数 $D_{pl}(\rho, L)$ 随空间间隔距离 ρ 的增加而单调递增, 但图 2 (b) 中的 $D_{pl}(\rho, L)$ 值显著高于图 2 (a), 这意味着图 2 (b) 中的海洋湍流环境对波前的扰动更加剧烈。在 ρ 和 L 相同时, 图 2 (b) 中的 $D_{pl}(\rho, L)$ 值远高于图 2 (a), 尤其是在较大的传输距离 (例如 $L = 200$ m) 下, $D_{pl}(\rho, L)$ 的差异更加明显。这显示出图 2 (b) 中的海洋湍流效应更强。综合图 2 (a) 和图 2 (b) 的数值仿真结果, 大气湍流对光波的扰动通常较小, 而海洋湍流由于介质密度和流动特性更复杂, 对波前的破坏更严重。

综上, 在两种不同光学湍流环境下, 平面波通过两种湍流介质传输, 波结构函数随传输距离和空间间隔距离均显著增加, 但图 2 (b) 中的 $D_{pl}(\rho, L)$ 数值远高于图 2 (a), 表明海洋湍流对平面波相干性的破坏远大于大气湍流。随着传输距离的增加, $D_{pl}(\rho, L)$ 的增长幅度在图 2 (b) 中更加显著, 显

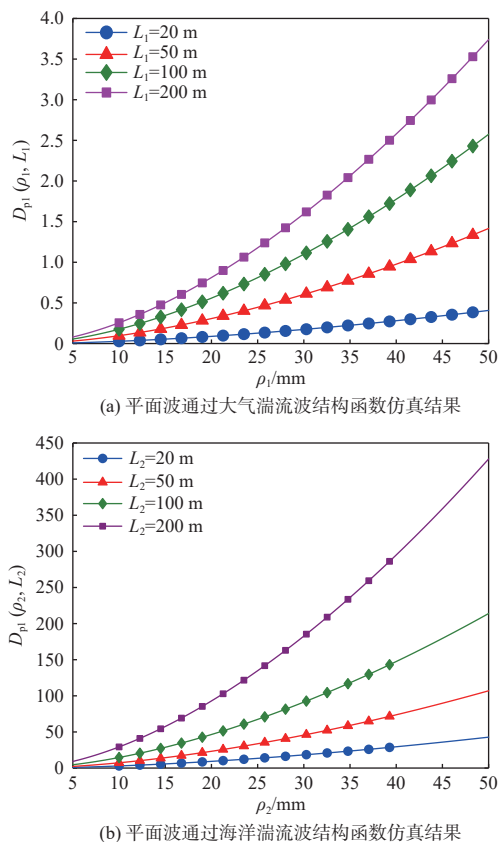


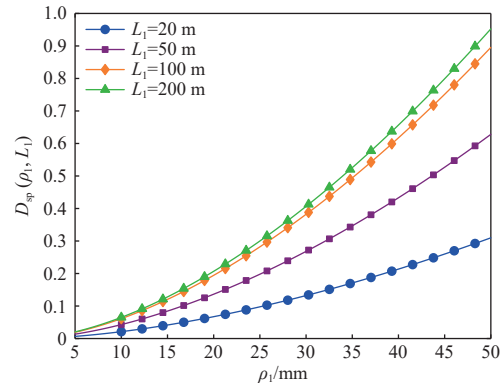
图 2 平面波经大气湍流和海洋湍流传输不同距离, 波结构函数随空间间隔变化

Fig. 2 Relationship between wave structure function and spatial separation for plane wave propagating through turbulent atmosphere and ocean turbulence over different distances

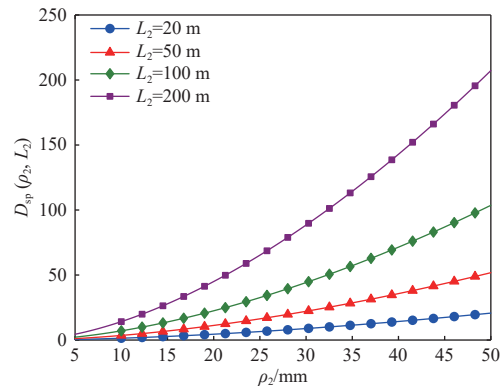
示出在海洋湍流环境下,湍流的累积效应对波前破坏的放大作用更加明显。整体而言,图 2 (a) 和图 2 (b) 都表明光学湍流对波的影响随传输距离和空间间隔距离增加而增强,尤其是在海洋湍流中,这种影响更为剧烈。海洋湍流引起的波前不均匀性在传输距离较远和空间间隔较大的情况下表现得尤为显著。现有文献中^[17],研究仅集中于单一湍流介质对单一光源传输影响。本研究创新性地比较了两种不同的湍流环境,使得研究结果更加全面,并提出了不同湍流效应对光波的传输特性,还进一步研究了传播距离与湍流类型对光波传播的对比,研究结果更加丰富,具有较高的实用价值。此外,本研究考虑了空间间隔距离从非常小的值 (5 mm) 到 50 mm 的范围,为描述平面波传播不同距离下的特性变化提供了更多细节。

为了确定球面波通过大气湍流和海洋湍流传输的波结构函数,同样地,也绘制了波结构函数随空间间隔距离变化的关系曲线,如图 3 所示。在大气湍流介质中 (图 3 (a)), 球面波波结构函数 $D_{sp}(\rho_1, L_1)$ 随空间间隔距离 ρ_1 变化。当球面波通过大气湍流传输距离 $L_1 = 20$ m, ρ_1 从 5 mm 增加到 50 mm 时, $D_{sp}(\rho_1, L_1)$ 从 0.0 067 增至 20.7 276; 当球面波通过大气湍流传输距离 $L_1 = 200$ m, ρ_1 从 5 mm 增加到 50 mm 时, $D_{sp}(\rho_1, L_1)$ 从 0.0 205 增加到 0.9 526。在海洋湍流中 (图 3 (b)), 当球面波传输距离 $L_2 = 20$ m, ρ_2 从 5 mm 增加到 50 mm 时, $D_{sp}(\rho_2, L_2)$ 从 0.4 466 增加到 20.725 6; 当 $L_2 = 200$ m, ρ_2 从 5 mm 增加到 50 mm 时, $D_{sp}(\rho_2, L_2)$ 从 4.4 656 增加到 207.2 756。也就是在相同空间间隔下,球面波通过海洋湍流介质传输时的波结构函数数值远高于大气湍流,表明海洋湍流对光相干性的破坏更严重; 当 $\rho_2 = 30$ mm, $L_2 = 20$ m 与 $L_2 = 200$ m 处的 $D_{sp}(\rho_1, L_1)$ 分别为 8.8 471 和 88.4 709。在湍流大气中 (图 3 (a)), 当 $\rho_1 = 30$ mm, $L_1 = 20$ m 与 $L_1 = 200$ m 处的 $D_{sp}(\rho_1, L_1)$ 分别为 0.1 323 和 0.4 066。在海洋湍流中 (图 3 (b)), 当 $\rho_2 = 30$ mm, $L_2 = 20$ m 与 $L_2 = 200$ m 处的 $D_{sp}(\rho_1, L_1)$ 分别为 8.8 471 和 88.4 709。由此,得出海洋湍流的累积效应比湍流大气更强,在相同条件下 $D_{sp}(\rho, L)$ 值增长速度更快,说明光学湍流性质对波的影响不仅与传输距离相关,还与光学湍流介质特性有关; 此外,湍流累积效应在海洋湍流中的非线性特征比湍流大气更显著。湍流累积效应对光通信系统和成像系统的设计具有重要意义。在大气湍流条件下,需要补偿较小的湍

流效应,而在海洋湍流环境中,则需设计更强的抗湍流措施以减小相干性破坏。



(a) 球面波通过大气湍流的波结构函数仿真结果



(b) 球面波通过海洋湍流的波结构函数仿真结果

图 3 球面波经大气湍流和海洋湍流传输不同距离,波结构函数随空间间隔变化

Fig. 3 Relationship between wave structure function and spatial separation for spherical waves propagating through turbulent atmosphere and ocean turbulence over different distances

与文献^[17]相比,本研究不仅关注平面波在光学湍流介质中的传输,还通过引入球面波传输模型,扩展到球面波的传输分析,通过双波模型从平面波和球面波传播视角对光学湍流的影响进行更加全面的分析,以提高数值仿真实验结果的精确性,进一步深入理解不同湍流介质在不同类型波传播中的作用机制。

为了探究双波模型光束经大气湍流和海洋湍流介质传输的空间相干函数,绘制了双波模型在大气湍流和海洋湍流介质中传输不同距离,空间相干函数随空间间隔变化的关系曲线,如图 4 和图 5 所示。如图 4 (a) 和图 5 (a) 所示,尽管传输距离不断增大,双波模型光束经近低空大气湍流介质传输受到的扰动均相对较小,光束质量得以较好地保持。如图 4 (b) 和图 5 (b) 所示,随着传输距

离不断增大,双波模型光束经海洋湍流介质传输时受到的扰动较大。需要强调的是,在本研究的数值分析中,光束在进入大气湍流介质和海洋湍流介质时均假设为完全相干光,以便于对比不同湍流环境下的传输效应。在实际物理过程中,光束从大气湍流介质进入海洋湍流介质时,其空间相干性显著削弱,呈现为部分相干光的特征。当光束通过大气湍流和海洋湍流介质分别传输 200 m 时,大气湍流对空间相干性相比于海洋湍流影响较小,衰减速度较慢,光传输质量相对较为稳定;当光束通过海洋湍流介质传输时,已经出现显著的衰减效应,相干性几乎丧失,表明海洋湍流对光波的传输影响较为剧烈,该数值仿真结果与理论分析结果一致,同时与分析双波模型光束经两种湍流介质传输波结构函数的结果相符。这是因为在海洋湍流环境中,受到海水的趋肤效应影响,使得光波的衰减吸收严重,因此,探索如何实现激光经海洋环境远距离传输至关重要。同时也要注意,

在实际工程中可选用部分相干高斯光束通过光学湍流介质进行传输。

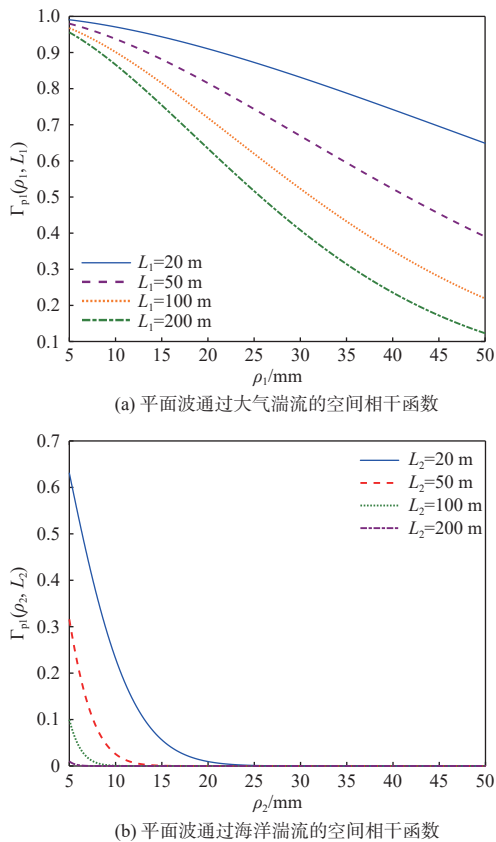
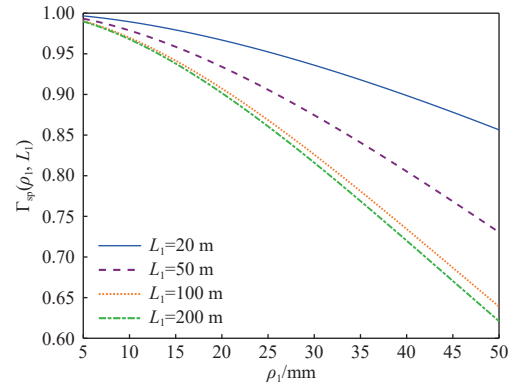
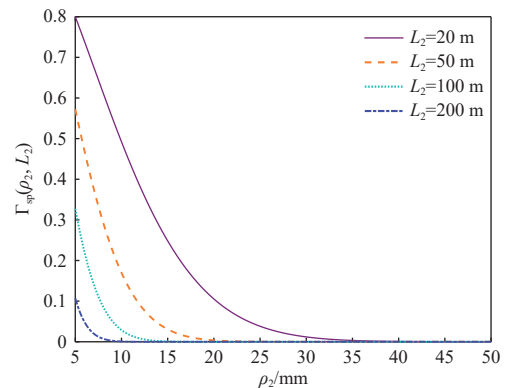


图4 平面波经大气湍流和海洋湍流传输不同距离,空间相干函数随空间间隔变化

Fig. 4 Relationship between spatial coherence function and spatial separation for plane wave propagating through turbulent atmosphere and ocean turbulence over different distances



(a) 球面波通过大气湍流的空间相干函数



(b) 球面波通过海洋湍流的空间相干函数

图5 球面波经大气湍流和海洋湍流传输不同距离,空间相干函数随空间间隔变化

Fig. 5 Relationship between spatial coherence function and spatial separation for spherical wave propagating through turbulent atmosphere and ocean turbulence over different distances

4 结论

本文针对空海跨域通信双波模型光束通过海上大气-海洋下行链路混合信道传输,在光学湍流条件下,同时推导了双波模型经大气湍流以及海洋湍流扰动后,波结构函数、空间相干长度和空间相干函数的解析式,并基于典型实际环境下进行了数值仿真实验。数值仿真结果表明,双波模型在空海跨域下行链路混合信道光传输中,随着传输距离增大,空间相干性均变差;双波模型经海洋湍流介质传输受到的扰动较大。经双波传播模型对比发现,将平面波扩展到球面波,提供了更广泛的传播模型;经两种湍流介质对比分析,联合考虑大气湍流和海洋湍流介质,提升了研究广度;波结构

函数定量分析,深入探讨了波结构函数在湍流介质中的变化,为实际应用提供了精确的数据支持。本文重点研究了双波模型光束在大气湍流与海洋湍流中传输的湍流效应,后续工作将继续探索空海跨域界面环境扰动下部分相干光通过光学湍流介质的传输特性。本研究可为空海跨域激光传输相干性研究提供更加准确和实用的解决方案。

参考文献:

- [1] 商志刚,张红玉,刘淞佐,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 Zhigang, ZHANG Hongyu, LIU Songzuo, et al. Research progress and development trend of air-sea cross-domain communication[J]. Journal of Unmanned Undersea Systems, 2024, 32(4): 592-610.
- [2] 陈纯毅.无线光通信中的大气影响机理及抑制技术研究[D].长春:长春理工大学,2009.
CHEN Chunyi. Study on mechanism and mitigation technology of atmospheric effects in optical wireless communications[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2009.
- [3] 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.
CHEN Chunyi, YANG Huamin, REN Bin, 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.
- [4] 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 Chunyi, YANG Huamin, JIANG Huilin, et al. Research progress of mitigation technologies of turbulence effects in atmospheric optical communication[J]. Acta Armamentarii, 2009, 30(6): 779-791.
- [5] 杨亚欣,姚海峰,刘智,等.基于复合相位屏的光传输多孔径接收特性研究[J].应用光学,2024,45(5):1085-1094.
YANG Yaxin, YAO Haifeng, LIU Zhi, et al. Research on multi-aperture receiving characteristics of optical transmission based on composite phase plate[J]. Journal of Applied Optics, 2024, 45(5): 1085-1094.
- [6] CHEN C 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.
- [7] CHEN C Y, YANG H M, TONG S 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.
- [8] 韩美苗,柯熙政,梁静远.部分相干光在大气湍流中传输特性的研究进展[J].电波科学学报,2024,39(2):191-204.
HAN Meimiao, KE Xizheng, LIANG Jingyuan. Research progress on the propagation characteristics of partially coherent beam in atmospheric turbulence[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2024, 39(2): 191-204.
- [9] 苗希彩.蓝绿激光海洋湍流及其下行信道传输特性研究[D].西安:西安电子科技大学,2017.
MIAO Xicai. Study of the characteristics of blue-green laser propagating through oceanic turbulence and downlink channel [D]. Xi'an: Xidian University, 2017.
- [10] 陆璐.海洋湍流对激光束传输的影响[D].合肥:中国科学技术大学,2016.
LU Lu. Influence of oceanic turbulence on propagation of laser beams[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2016.
- [11] 饶瑞中.现代大气光学[M].北京:科学出版社,2012:417-419.
RAO Ruizhong. Modern atmospheric optics[M]. Beijing: Science Press, 2012: 417-419.
- [12] ITU-R Document 3J/31-E. On propagation data and prediction methods required for the design of space-to-earth and earth-to-space optical communication systems[C]//Proceedings of the Radio Communication Study Group Meeting (International Telecommunication Union). Budapest, Hungary: [s.n.], 2001: 277-293.
- [13] NIJISHOV V V, NIJISHOV V I. Spectrum of turbulent fluctuations of the sea-water refraction[J]. International Journal of Fluid Mechanics Research, 2000, 27(1): 82-98.
- [14] ANDREWS L C, PHILLIPS R L. The International Society for Optical Engineering[M]. [S.l.]: SPIE, 2005: 195.
- [15] LU L, JI X L, YAHYA B. Wave structure function and spatial coherence radius of plane and spherical waves propagating through oceanic turbulence[J]. Optics Express, 2014, 22(22): 27112.
- [16] DUNTLEY, SEIBERT Q. Light in the sea[J]. Journal of

-
- [the optical society of America](#), 1963, 53(2): 214-233.
- [17] ZHAO G Q, YAN Q Z, YU L, et al. Spatial coherence length and wave structure function for plane waves transmitted in anisotropic turbulent oceans[J]. [Journal of the Optical Society of America, A: Optics, Image Science, and Vision](#), 2023, 40(8): 1602-1611.