

引用本文:刘涛,吴彤,赵硕,等.异常涡旋光束在吸收性海洋湍流中的传输特性研究[J].光通信技术,2024,48(5):80-85.

异常涡旋光束在吸收性海洋湍流中的传输特性研究

刘涛^{1,2,3}, 吴彤¹, 赵硕¹, 李斌¹, 张荣香⁴, 刘晨霞^{1,2,3}

(1.华北电力大学 电子与通信工程系,河北 保定 071003;2.华北电力大学 河北省电力物联网技术重点实验室,河北 保定 071003;
3.华北电力大学 保定市光纤传感与光通信技术重点实验室,河北 保定 071003;4.河北大学 物理科学与技术学院,河北 保定 071002)

摘要:为了分析海水的吸收和湍流特性对涡旋光束传输性能影响,在同时考虑海水的吸收效应和湍流效应的基础上,推导出了异常涡旋光束的轨道角动量(OAM)模式探测概率的解析表达式,并详细讨论了吸收性湍流海水对异常涡旋光束的螺旋相位谱、探测概率以及串扰概率的影响。仿真结果表明:海水的吸收效应不可忽略,它会导致探测概率下降;吸收性海洋湍流会导致螺旋相位谱扩展,并且随着 OAM 模式数的增加,螺旋相位谱的扩展程度变大;随着海洋湍流的温度方差耗散率、温度与盐度贡献比的减小,以及湍流动能耗散率的增大,OAM 模式的探测概率增大,串扰概率减小。

关键词:异常涡旋光束;海水吸收;海洋湍流;探测概率

中图分类号:TN929.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2024)05-0080-06

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2024.05.013

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Study on the transmission characteristics of anomalous vortex beams in absorptive ocean turbulence

LIU Tao^{1,2,3}, WU Tong¹, ZHAO Shuo¹, LI Bin¹, ZHANG Rongxiang⁴, LIU Chenxia^{1,2,3}

(1. Department of Electronic and Communication Engineering, North China Electric Power University, Baoding Hebei 071003, China;
2. Hebei Key Laboratory of Power Internet of Things Technology, North China Electric Power University, Baoding Hebei 071003, China;
3. Baoding Key Laboratory of Optical Fiber Sensing and Optical Communication Technology, North China Electric Power University, Baoding Hebei 071003, China; 4. College of Physics Science and Technology, Hebei University, Baoding Hebei 071002, China)

Abstract: In order to analyze the impact of the absorption and turbulence characteristics of seawater on the transmission performance of vortex beams, an analytical expression for the detection probability of the orbital angular momentum (OAM) mode of anomalous vortex beams is derived, taking into account both the absorption and turbulence effects of seawater. The influence of absorbing turbulent seawater on the spiral phase spectrum, detection probability, and crosstalk probability of anomalous vortex beams is discussed in detail. The simulation results indicate that the absorption effect of seawater cannot be ignored, as it can lead to a decrease in detection probability. Absorbing ocean turbulence can lead to the expansion of the spiral phase spectrum, and as the number of OAM modes increases, the degree of expansion of the spiral phase spectrum becomes greater. As the temperature variance dissipation rate, temperature salinity contribution ratio, and turbulence energy dissipation rate of ocean turbulence decrease, the detection probability of OAM mode increases and the crosstalk probability decreases.

Key words: anomalous vortex beam, seawater absorption, oceanic turbulence, detection probability

收稿日期:2024-04-09。

基金项目:国家自然科学基金(批准号:62071180)资助;中央高校基本科研业务费专项资金(编号:2020MS099)资助;华北电力大学研究生思政课程及课程思政建设项目资助。

作者简介:刘涛(1981—),男,博士,副教授。2009年毕业于北京邮电大学信息光子学与光通信国家重点实验室,曾在美国亚利桑那大学担任访问学者。长期从事光通信、量子通信和非线性光学等领域的科研和教学工作,主持国家自然科学基金项目2项、河北省自然科学基金1项。



0 引言

涡旋光束是一种新型光束,具有特殊的光场结构,能够携带轨道角动量(OAM)。此外,不同拓扑荷数的 OAM 模式在空间上是正交的^[1],并且可以在相同的空间路径下传输多路独立的信息,所以涡旋光束具有较大的信息传输容量和较高的抗干扰能力^[2]。将涡旋光束应用于水下无线光通信(UWOC)中,能够扩展通信容量、提高信息传输速度和增强保密性能。因此,越来越多的学者开始对涡旋光束在水下的传输特性进

行研究。

海洋湍流是影响涡旋光束水下传输性能的重要因素。WANG H 等人^[3]研究了汉克尔-贝塞尔(HB)涡旋光束在不同海洋湍流中的串扰程度, 研究结果表明, HB 涡旋光束在各向异性湍流中的通信性能优于各向同性湍流。YAN Q 等人^[4]研究了完美光涡旋(POV)光束在从弱到强湍流条件下的传输特性, 并推导了 POV 光束在海洋湍流中传输时的探测概率、误码率和信道容量。李晓记等人^[5]利用功率谱反演法建立了海洋湍流的相位屏模型, 并研究了海洋湍流对拉盖尔-高斯(LG)光束的 OAM 模式螺旋谱的影响, 研究结果表明, 湍流明显引起了 OAM 模式串扰和螺旋频谱扩展。刁鲁欣等人^[6]研究了双拉盖尔-高斯涡旋光束(DLGVB)在海洋湍流环境下的闪烁指数和误码率。此外, 许多研究人员^[7-9]也对涡旋光束在湍流海水中的传输特性进行了分析, 为涡旋光束在 UWOC 系统中的应用提供了参考。但是, 上述研究中都未考虑海水吸收效应对涡旋光束传输性能的影响。

异常涡旋(AV)光束是由 YANG Y^[10]等人于 2013 年提出的一种涡旋光束, 研究发现, AV 光束在远场会演变成优雅拉盖尔-高斯(ELG)光束; 如果径向指数非常高, 则其接近于贝塞尔-高斯(BG)光束; 当径向指数趋向于无限大时, 它可以等效为贝塞尔光束。这一特性使得 AV 光束成为产生 ELG 光束或 BG 光束的一种新方法。2022 年, 张艺伟等人^[11]详细研究了 AV 光束在分层海洋湍流环境中的光强与相位特性, 并揭示了其在通过该环境后倾向于退化为高斯光束的现象。然而, 他们并未进一步探讨 AV 光束在海洋湍流条件下 OAM 模式的探测概率。探测概率不仅能够直观展示海洋湍流对 OAM 信号功率的影响, 而且是计算信道容量和误码率时不可或缺的参考依据。因此, 深入研究 AV 光束在海洋湍流中的探测概率显得尤为重要。此外, 关于海水吸收效应对 AV 光束的潜在影响的研究, 目前尚未见相关报道, 这进一步凸显了此关研究的迫切性和重要性。为此, 本文研究 AV 光束在吸收性海洋湍流中的传输特性。

1 AV 光束在吸收性海洋湍流中的传输特性

1.1 海水吸收效应

海水是一种复杂的混合溶液, 包含了水分子、叶绿素以及可溶解有机物等, 所以海水的吸收光谱与海水成分密切相关。海水也是一种吸收性介质^[12], 其折射率 n_{oc} 是复数, 可以表示为

$$n_{oc} = n_R + i n_I \quad (1)$$

其中, i 是复数符号, n_R 和 n_I 分别是 n_{oc} 的实部和虚部。

因此, 光在海水中的波数 k 也是复数, 表示为

$$k = 2\pi(n_R + i n_I)/\lambda \quad (2)$$

其中, λ 是真空中波长。海水折射率的虚部 n_I 可以通过式(3)进行计算^[13]。

$$n_I = \lambda c_{oc} / 4\pi \quad (3)$$

其中, c_{oc} 为海水的吸收系数^[14], 主要包含纯水的吸收系数、浮游植物内叶绿素的吸收系数以及浮游植物中的营养物质黄腐酸和腐殖酸的吸收系数。

由式(1)~式(3)可知, 海水的吸收效应会影响海水的折射率 n_{oc} , 进而对光波数 k 产生影响。

1.2 AV 光束在吸收性海洋湍流中的传输

AV 光束的复振幅^[15]可表示为

$$E_{m,n}^0(\rho, \phi, z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{i^{(m+1)}}{\lambda z} \frac{\pi n!}{\lambda z} \exp(-ikz) w_0^{2n+|m|+2} \times \left(\frac{\rho}{w}\right)^{|m|} \exp\left(-\frac{\rho^2}{2w}\right) L_n^{|m|}\left(\frac{\rho^2}{w}\right) \exp(-im\phi) \quad (4)$$

其中, ρ 是径向坐标, ϕ 是方位角, z 是传输距离, m 是 OAM 模式数(拓扑荷数), n 是径向指数, $L_n^{|m|}\left(\frac{\rho^2}{w}\right)$ 是阶数为 m 和 n 的拉盖尔多项式; z 处的光束半径 $w = w_0 \sqrt{1 + (z/z_k)^2}$, w_0 为初始束腰半径, $z_k = kw_0^2/2$ 是瑞利范围。

根据 Rytov 近似原理, AV 光束在湍流海水中传输的复振幅为

$$E_{m,n}(\rho, \phi, z) = E_{m,n}^0(\rho, \phi, z) \exp[\psi(\rho, \phi, z)] \quad (5)$$

其中, ψ 是由湍流所导致的相位扰动。

在海洋湍流环境中, AV 光束在接收平面的二阶交叉光谱密度的表达式为

$$W(\rho, \phi, \phi', z) = E_{m,n}(\rho, \phi, z) E_{m,n}^*(\rho, \phi', z) \approx E_{m,n}(\rho, \phi, z) E_{m,n}^{0,*}(\rho, \phi', z) \times \exp\left[-\frac{1 - \cos(\phi - \phi')}{\rho_0} 2\rho^2\right] \quad (6)$$

其中, “*” 为复数共轭符号, 海洋湍流中的球面波空间相干长度^[16] ρ_0 可以表示为

$$\rho_0 = \left[\frac{\pi^2 k^2 z}{3} \int_0^\infty \kappa^3 \Phi_n(\kappa) d\kappa \right]^{-1/2} \quad (7)$$

其中, $\Phi_n(k)$ 为海洋湍流空间折射功率谱模型^[17], 可以

刘涛,吴彤,赵硕,等:异常涡旋光束在吸收性海洋湍流中的传输特性研究

表示为

$$\Phi_n(k) = (4\pi\kappa^2)^{-1} C_0 \left(\frac{\alpha^2 \chi_T}{\omega} \right)^{-\frac{1}{3}} \kappa^{-\frac{5}{3}} \times \left[1 + C_1 (\kappa\eta)^{\frac{2}{3}} \right] \times \left[\omega^2 e^{-A_T \delta} + d_t e^{-A_S \delta} - \omega(d_t + 1) e^{-A_{TS} \delta} \right] \quad (8)$$

其中, $\delta = 8.284(\kappa\eta)^{\frac{4}{3}} + 12.978(\kappa\eta)^2$, κ 是空间波数, η 是 Kolmogorov 内尺度; $A_T = 1.863 \times 10^{-2}$ 为温度因子, $A_S = 1.9 \times 10^{-4}$ 为盐度因子, $A_{TS} = 9.41 \times 10^{-3}$ 为综合影响因子; 常数 $C_0 = 0.72$, $C_1 = 2.35$; χ_T 为海水温度方差耗散率; ε 为湍流动能耗散率; ω 为温度与盐度波动导致折射率变化所贡献的比率, 简称温盐比; d_t 为涡流扩散率。在过去对涡旋光束在海水中传输特性的研究中, 为简化分析过程, 研究者们普遍假设 $d_t = 1$, 这一假设与海水稳定分层的环境条件相对应。但对于海水不稳定分层的情况, 需要利用温盐比 ω 对涡流扩散率 d_t 进行计算, 其表达式为

$$d_t = \begin{cases} \left[|\omega| - \sqrt{|\omega|(|\omega| - 1)} \right]^{-1} |\omega|, & |\omega| \geq 1 \\ (1.85 - 0.85|\omega|^{-1}) |\omega|, & 0.5 \leq |\omega| \leq 1 \\ 0.15 |\omega|, & |\omega| < 0.5 \end{cases} \quad (9)$$

通过上述分析可以看出, 当 AV 光束在海水环境中传输时, 海水的吸收和海洋湍流会同时对 AV 光束的复振幅产生影响。因此, 当利用 AV 光束在水下进行通信时, 海水的吸收和湍流效应会导致通信性能的下降。

1.3 探测概率

在基于涡旋光束的 UWOC 系统中, 探测概率是计算信道容量和误码率的重要基础。本文对 AV 光束水下传输的探测概率进行了推导。当 AV 光束经过海水湍流传输后, 发射的 OAM 模式能量会扩散到其它模式上, 这一现象被称为模式串扰。模式串扰会降低接收端检测到发射 OAM 模式的概率。接收到的 AV 光束可以表示成多个 OAM 模态的叠加, 即

$$E_{m,n}(\rho, \phi, z) = \sum_l \beta_l(\rho, z) \exp(i l \phi) \quad (10)$$

其中, l 为接收端在海洋湍流影响下能接收到的所有可能 OAM 模式的数量。 $\beta_l(\rho, z)$ 为不同模式的系数, 表示为

$$\beta_l(\rho, z) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} E_{n,m}(\rho, \phi, z) \exp(-i l \phi) d\phi \quad (11)$$

对 $\beta_l(\rho, z)$ 进行系综平均, 可得 AV 光束 OAM 模式概率密度的表达式为

$$\begin{aligned} \langle |\beta_l(\rho, z)|^2 \rangle &= \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} W(\rho, \phi, \phi', z) \times \\ &\exp[-i l (\phi - \phi')] d\phi d\phi' = 2\pi (-1)^{(m+1)} \left(\frac{\pi n!}{\lambda z} \right)^2 \times \\ &w_0^{4n+2|m|+4} \left(\frac{\rho}{w} \right)^{2|m|} \exp\left(-\frac{2\rho^2}{w^2}\right) \times \left[L_n^{|m|} \left(\frac{\rho^2}{w^2} \right) \right]^2 \times \\ &\exp\left(-\frac{2\rho^2}{\rho_0^2}\right) I_l \left(\frac{2\rho^2}{\rho_0^2} \right) \end{aligned} \quad (12)$$

模式数为 l 的 AV 光束探测概率可定义为

$$P_l(z) = \frac{E_l(z)}{\sum_{s=-\infty}^{\infty} E_s(z)} = \frac{\int_0^{D/2} \langle |\beta_l(\rho, z)|^2 \rangle \rho d\rho}{\sum_{s=-\infty}^{\infty} E_s(z)} \quad (13)$$

其中, D 为接收孔径, $E_l(z)$ 为模式数为 l 的接收 OAM

模式对应的能量, $\sum_{s=-\infty}^{\infty} E_s(z)$ 为接收端的全部 OAM 模式

的能量总和。当 $l=m$ 时, $P_m(z)$ 为发射、接收模式都为 m 时的探测概率, 表示 OAM 信号的正确接收率; 反之, $l=m+\Delta m$ ($|\Delta m|=1, 2, 3, \dots, n$) 时, $P_{\Delta m}(z)$ 为 OAM 模式的串扰概率, 反映了在海水湍流的影响下, 光束 OAM 初始信号模式扩散到其它 OAM 模式的程度。

2 数值分析

本文仿真分析海水的吸收和湍流效应对 AV 光束传输特性的影响。仿真使用的主要参数^[11,13]如下: $m=1$, $n=1$, $\lambda=532$ nm, $\varepsilon=1 \times 10^{-4}$ m²/s³, $\chi_T=1 \times 10^{-8}$ K²/s, $\omega=-4$, $\eta=1 \times 10^{-3}$ m, $D=0.03$ m, $w_0=0.03$ m, $c_{\omega}=0.125$ m⁻¹, $n_R=1.34$, $\Delta m=2$ 。

2.1 研究海水的吸收效应对 AV 光束传输特性的影响

在忽略吸收和考虑吸收 2 种情况下, 探测概率 P_m 随传输距离 z 的变化情况如图 1 所示。可以看出, AV 光束在考虑吸收时的探测概率更小, 这是由于海水吸收降低了信号强度。以 $z=50$ m 为例, 在考虑吸收时 AV 光束的探测概率为 0.4, 比忽略吸收的探测概率小 0.1 左右。这说明在 UWOC 的研究中, 海水的吸收作用不可忽视。因此, 在后续分析海洋湍流效应的影响时, 需同时考虑海水的吸收效应, 这使得本文的研究更贴近真实的海洋环境。

然后, 当传输距离为 20 m, OAM 发射模式(信号模式)数 m_{TM} 分别取 0、1、2 时, AV 光束的螺旋相位谱如图 2 所示。可以看出, 海洋湍流导致了明显的模式串扰。当 $m_{TM}=1$ 、接收模式数 $m_{RM}=0$ 时, 相应绿色柱状图

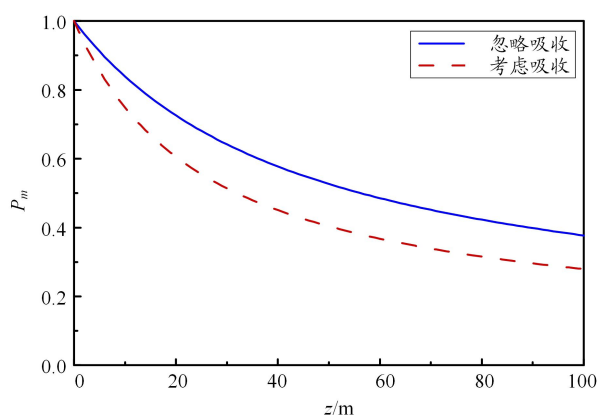
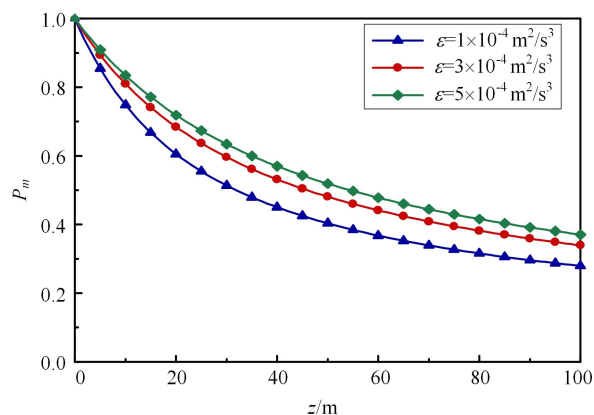


图1 忽略和考虑吸收时探测概率随传输距离的变化规律



(a) 探测概率

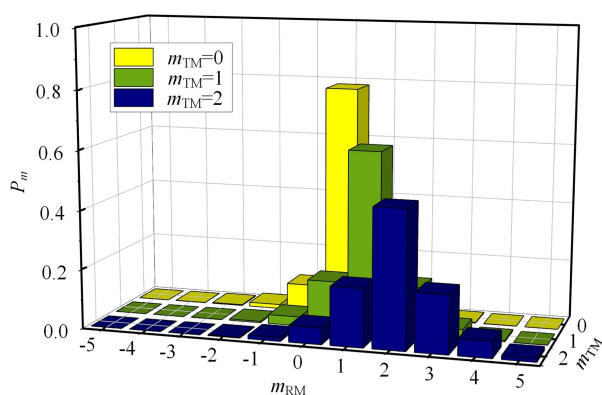
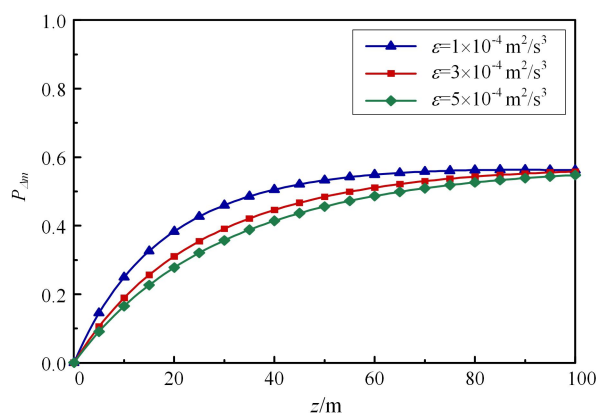


图2 AV光束的螺旋相位谱



(b) 串扰概率

图3 在不同 ϵ 下, AV 光束的

探测概率和串扰概率随传输距离的变化规律

的串扰概率值约为 0.15, 并且随着 m_{TM} 的增大, OAM 信号模式的探测概率减小, 即模式串扰概率随之增大。此外, OAM 信号模式将主要向相邻的 OAM 模式进行扩展, 且随着与目标信号模式距离的增加, 检测到的能量值将逐渐减小。因此, 在分析海洋湍流对 OAM 模式串扰的影响时, 本文选择 $|\Delta m| \leq 2$ 以内的所有模式串扰概率。

2.2 海洋湍流能耗散率对 AV 光束传输性能的影响

在海洋湍流能耗散率 ϵ 取值不同的情况下, AV 光束的探测概率 P_m 和串扰概率 $P_{\Delta m}$ 随传输距离 z 变化的情况如图 3 所示。可以看出, 随着 ϵ 的减小, P_m 逐渐减小, 而 $P_{\Delta m}$ 不断增加。当 $z=100$ m 时, 不同 ϵ 下的 $P_{\Delta m}$ 趋于一致。这是因为随着湍流能耗散率的减小, 相应的湍流强度会更大, 从而导致 OAM 模式之间能量发生严重泄漏。但是, 当传输距离较长时, 湍流能耗散率引起的信号模式能量扩散到相邻模式上会趋于稳定。

2.3 温度方差耗散率对 AV 光束传输性能的影响

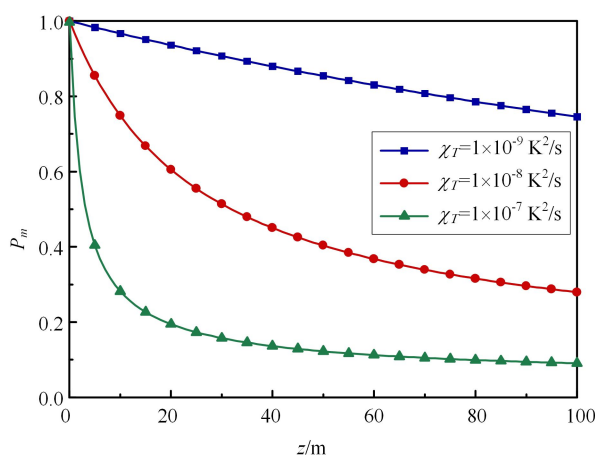
在不同温度方差耗散率 χ_T 时, AV 光束的探测概率 P_m 和串扰概率 $P_{\Delta m}$ 随传输距离 z 变化的规律如图 4 所示。从图 4(a)可以看出, 当 z 相同时, 由于 χ_T 的差

异, P_m 变化显著。当 χ_T 从 1×10^{-9} K²/s 增加到 1×10^{-7} K²/s, 3 种 χ_T 情况下的 P_m 分别为 0.86、0.41 和 0.12。这是因为海洋湍流中 χ_T 的提升加剧了 AV 光束的发散, 进而降低了探测的成功率。此外, 在 3 种 χ_T 情况下, 相应的 P_m 都会随着 z 的增加而下降, 并且 χ_T 越大, 在初始传输阶段 P_m 衰减得越快。从图 4(b)可以看出, 当 $\chi_T=1 \times 10^{-9}$ 和 1×10^{-8} K²/s 时, $P_{\Delta m}$ 随着 z 的增加而增大。然而, 当 $\chi_T=1 \times 10^{-7}$ 时, $P_{\Delta m}$ 随着 z 先增加, 在 $z=18$ m 时达到最大值, 然后随着 z 的进一步增大而逐渐减小。这是因为在强湍流环境下, OAM 模式串扰更加严重, 并且不止信号模式会串扰到与之相邻的 OAM 模式上, 这些临近信号模式的 OAM 模式也会继续向与它们相邻的模式扩展, 从而造成 $|\Delta m| \leq 2$ 以内的串扰概率呈现先上升后下降的趋势。

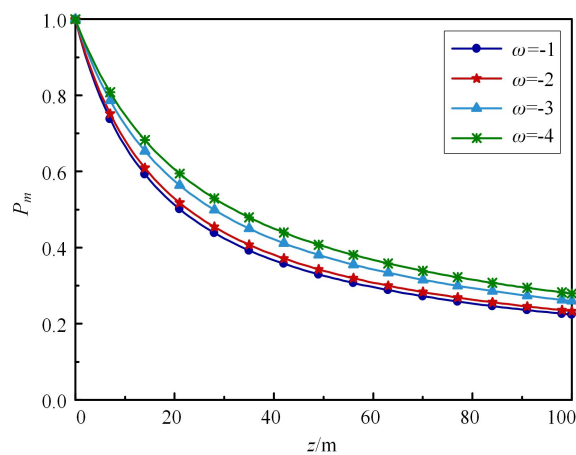
2.4 温度与盐度贡献比对 AV 光束传输性能的影响

在不同温度与盐度贡献比 ω 时, AV 光束的探测概率 P_m 和串扰概率 $P_{\Delta m}$ 随传输距离 z 变化的规律如

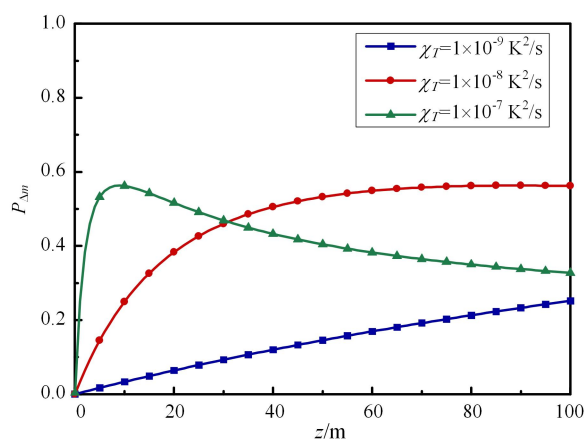
刘涛, 吴彤, 赵硕, 等: 异常涡旋光束在吸收性海洋湍流中的传输特性研究



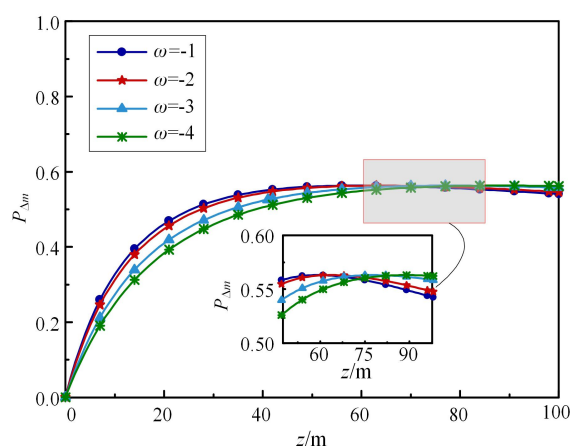
(a) 探测概率



(a) 探测概率



(b) 串扰概率



(b) 串扰概率

图4 在不同 χ_T 下, AV 光束的探测概率和串扰概率随传输距离的变化规律

图5 在不同 ω 下, AV 光束的探测概率和串扰概率随传输距离的变化规律

图5所示。当 ω 接近 0 时, 盐度波动为湍流的主导因素, 而 ω 接近 -5 时, 温度波动成为湍流的主导因素。从图5(a)可以看出, 在相同 z 下, P_m 随 ω 的增大而减小, 这表明盐度波动对 AV 光束传输性能的影响比温度波动对其影响要大。因此, 海水盐度对 AV 光束探测概率衰减的影响更为显著。从图5(b)可以看出, 当 AV 光束传输到约 74 m 时, $\omega = -1$ 和 -2 的 $P_{\Delta m}$ 随 z 的增加, 从逐渐上升转变为逐渐下降。造成此结果的原因与图4中 $\chi_T = 1 \times 10^{-7}$ 时的原因相似, 即在盐度波动占主导的湍流中, 随着传输距离的增加, OAM 信号模式扩展到临近的 $|\Delta m| \leq 2$ 以内的 4 个模式上的概率增加, 但随着传输距离的继续增大, 这 4 个模式也会向与它们相邻的模式扩展, 使得信号模式的能量泄露到更多模式上, 造成串扰概率又呈现下降趋势。

2.5 吸收效率对 AV 光束传输性能的影响

AV 和 LG 涡旋光束在忽略和考虑吸收 2 种情况下的探测概率 P_m 对比情况如图6所示。可以看出, 无

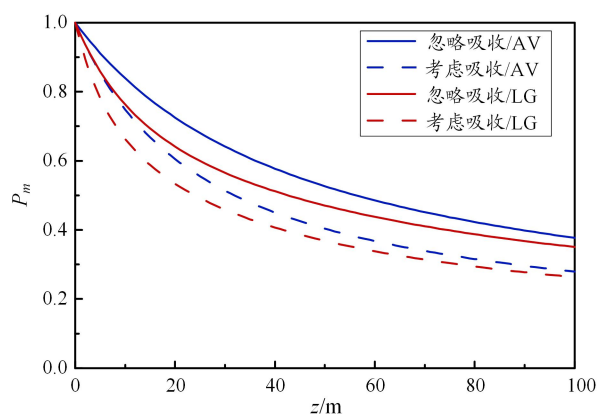


图6 在忽略和考虑吸收时, AV 和 LG 光束的探测概率对比

论是在忽略吸收还是考虑吸收的情况下, AV 光束的 P_m 曲线要始终高于 LG 涡旋光束, 即与 LG 涡旋光束相比, AV 光束受海洋湍流的影响较小, 其在海水中的传输性能较好。此外, 在考虑吸收时, 2 种光束的 P_m 均有

所减小,这证明了在研究水下通信时,吸收效应不能忽视。

为了验证本文所建立的 AV 光束水下传输模型及仿真结果的有效性,将本文所得结果与文献[15, 18]的结果进行了对比,所得结论相同。但是,本文的数值仿真过程中更加充分考虑了海水的吸收效应,这一特性使得本文所建立的涡旋光束水下传输计算模型相较于其它模型更能准确反映实际场景,从而具有更高的实用性和可靠性。

综合上述分析可知,海水的吸收效应和湍流效应对 AV 光束的水下传输特性都会造成影响,并且不同的海水湍流环境,对 AV 光束的探测概率和串扰概率的影响规律是不同的。因此,在使用 AV 光束进行水下通信时,应根据实际海水环境对相应的 UWOC 系统进行设计。

3 结束语

本文在考虑海水吸收效应的前提下,研究了海洋湍流对 AV 光束螺旋相位谱、探测概率以及串扰概率的影响。首先,推导了 AV 光束在吸收性海洋湍流信道中传输后的探测概率表达式。随后,分析了海水吸收、海水湍流动能耗散率、温度方差耗散率以及温度与盐度贡献比对 AV 光束传输性能的影响,并对比了 AV 和 LG 这 2 种涡旋光束的探测概率。仿真结果表明:海水吸收会导致探测概率下降,吸收效应的影响不可忽略,AV 光束的水下传输性能要优于 LG 涡旋光束。此外,海洋湍流造成了明显的螺旋谱扩展,OAM 模式数越大,螺旋相位谱扩展越严重。随着湍流动能耗散率的增加、温度方差耗散率的减小以及温度与盐度贡献比的减小,AV 光束的探测概率增大,而串扰概率则呈现相反趋势。并且,在不同的湍流环境下,随着传输距离的增加,OAM 信号模式扩展的与之相邻的 4 个 OAM 模式上的规律是不一样的。本文的研究结果为基于 AV 光束的 UWOC 系统的实际应用提供了一定的参考。

参考文献:

[1] WILLNER E A, HUANG H, YAN Y, et al. Optical communications using orbital angular momentum beams[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2015, 7(1): 66–106.

[2] 刘俊,王健. 轨道角动量光信号处理研究进展[J]. *通信学报*, 2021, 42(11): 217–232.

[3] WANG H, LI H, ZHOU Y, et al. Research on the influence of anisotropic ocean on the capacity of vortex Hankel-Bessel beam[J]. *Optical Engineering*, 2022, 61(4): 046102-1–046102-13.

[4] YAN Q, ZHAO G, ZHU Y, et al. Average capacity and ABER for perfect optical vortex system in weakly to strongly turbulent oceans[J]. *Chinese Journal of Physics*, 2024, 87: 364–378.

[5] 李晓记,黄洁梅,王伟,等. 基于 Matlab 的水下 OAM 光通信仿真实验设计[J]. *实验室研究与探索*, 2021, 40(12): 143–147, 162.

[6] 刁鲁欣,王明军,黄朝军,等. 海洋湍流下双拉盖尔-高斯涡旋光束的闪烁指数与误码率研究[J]. *光子学报*, 2024, 53(2): 217–229.

[7] WANG X, MA Y, YUAN Q, et al. Properties of focused Laguerre-Gaussian beam propagating in anisotropic ocean turbulence[J]. *Chinese Physics B*, 2024, 33(2): 024208-1–024208-9.

[8] PAN Y, ZHAO M, ZHANG M, et al. Propagation properties of rotationally-symmetric power-exponent-phase vortex beam through oceanic turbulence[J]. *Optics & Laser Technology*, 2023, 159: 109024-1–109024-11.

[9] LI Y, XIE Y, LI B. Probability of orbital angular momentum for square Hermite-Gaussian vortex pulsed beam in oceanic turbulence channel[J]. *Results in Physics*, 2021, 28(9): 104590-1–104590-7.

[10] YANG Y, DONG Y, ZHAO C, et al. Generation and propagation of an anomalous vortex beam[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(24): 5418–5421.

[11] 张艺伟,王明军. 反常涡旋光束在分层海洋湍流中的光强和相位特性研究[J]. *激光杂志*, 2022, 43(6): 13–18.

[12] YANG H, YAN Q, ZHANG Y, et al. Received probability of perfect optical vortex in absorbent and weak turbulent seawater links[J]. *Applied Optics*, 2021, 60(35): 10772–10779.

[13] FEWELL M P, VON TROJAN A. Absorption of light by water in the region of high transparency: recommended values for photon-transport calculations[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(9): 2408–2421.

[14] 刘涛,邱佳,李佳佳,等. 偏振光子的水下传输特性分析[J]. *北京邮电大学学报*, 2022, 45(1): 121–126.

[15] OU J, YIN Z, CHI H, et al. Partially coherent anomalous vortex beam in anisotropic turbulence[J]. *Optics Communications*, 2023, 537: 129411-1–129411-7.

[16] LI Y, HAN Y, CUI Z, et al. Performance analysis of the OAM based optical wireless communication systems with partially coherent elegant Laguerre-Gaussian beams in oceanic turbulence[J]. *Journal of Optics*, 2019, 21(3): 035702-1–035702-17.

[17] ELAMASSIE M, UYSAL M, BAYKAL Y, et al. Effect of eddy diffusivity ratio on underwater optical scintillation index[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2017, 34(11): 1969–1973.

[18] 尹霄丽,郭翊麟,闫浩,等. 汉克-贝塞尔光束在海洋湍流信道中的螺旋相位谱分析[J]. *物理学报*, 2018, 67(11): 94–100.