



专题：可见光通信

水下无线光 MIMO 链路空间信道建模

刘晓谦¹, 唐昕柯², 董宇涵^{1,2}

(1. 清华大学深圳国际研究生院, 广东 深圳 518055; 2. 鹏城实验室, 广东 深圳 518055)

摘要: 水下无线光通信 (underwater wireless optical communication, UWOC) 因具有高速率、低时延、高灵活性及可拓展性的特点而被广泛应用于水下通信组网的建设。然而, 由于海水的吸收和散射效应, UWOC 链路的空间特性尚未得到广泛研究, 尤其是在多输入多输出 (multiple-input multiple-output, MIMO) 场景中。考虑了线性阵列 MIMO UWOC 链路几何模型, 提出使用加权指数函数多项式 (weighted exponential function polynomial, WEPF) 建模具有任意数量光源的通用 MIMO UWOC 系统链路接收平面的光子辐照度分布的方法。数值结果表明, 提出的 WEPF 模型与浑浊海水环境下的蒙特卡洛仿真结果高度吻合。

关键词: 水下无线光通信; 多输入多输出; 辐照度; 蒙特卡洛仿真

中图分类号: TP393

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2023109

Spatial channel modeling for MIMO underwater wireless optical links

LIU Xiaoqian¹, TANG Xinke², DONG Yuhuan^{1,2}

1. Shenzhen International Graduate School, Tsinghua University, Shenzhen 518055, China

2. Peng Cheng Laboratory, Shenzhen 518055, China

Abstract: Underwater wireless optical communication (UWOC) has been widely used in the construction of underwater communication network for the advantages of high data rates, small latency, high flexibility and scalability. However, due to the absorption and scattering effects of seawater, the spatial characteristics of UWOC links have not been studied extensively, especially in multiple-input multiple-output (MIMO) scenario. A linear array MIMO UWOC link geometry was considered and a weighted exponential function polynomial (WEPF) model was proposed to characterize the photon irradiance distribution at the receiving plane of general MIMO UWOC links with arbitrary numbers of light sources. Numerical results suggest that the proposed WEPF model fits well with the results of Monte Carlo simulations in turbid water environment.

Key words: underwater wireless optical communication, multiple-input multiple-output, irradiance, Monte Carlo simulation

收稿日期: 2023-04-15; 修回日期: 2023-05-15

通信作者: 董宇涵, dongyuhuan@sz.tsinghua.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.62201303); 广东省自然科学基金资助项目 (No.2022A1515010209)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.62201303), The Guangdong Basic and Applied Basic Research Foundation (No.2022A1515010209)

0 引言

水下无线光通信 (underwater wireless optical communication, UWOC) 是以激光或发光二极管承载信息, 以海水为介质, 以光电探测器为接收器的通信方式, 具有高速率、低时延、高灵活性及可拓展性的特点, 可成为水下声波通信 (underwater acoustic communication, UAC) 的有益补充甚至更具优势的水下无线通信技术^[1]。

研究表明, 光子在水下传播时会受吸收和散射的影响, 这将分别导致光子能量的损失和传播方向的改变^[2]。特别是在浑浊海水中, 传播光子被多次散射, 从而在时间和空间上引起信道色散^[3-4]。时间色散将引入码间干扰 (inter symbol interference, ISI), 从而恶化误码率 (bit error rate, BER) 性能^[5]; 空间色散将导致光子落在接收器之外, 造成能量损失, 通常需要更大的接收机孔径补偿, 但会加大系统开销。此外, 在多光源系统中, 空间色散还会导致相邻信道干扰 (adjacent channel interference, ACI)。

在时域, 针对单光源或多光源 UWOC 链路信道冲激响应建模的研究已经较为充分, 主要包括朗伯比尔定律、辐射传输方程 (radiative transfer equation, RTE) 和蒙特卡洛仿真等建模方法^[6-9]。朗伯比尔定律方法较为简单, 假定散射光子完全丢失, 但这与实际情况有所不符, 具有一定误差; RTE 方法较为精确且考虑了散射分量的贡献, 但该方法中精确的解析解很难获得, 计算复杂度高。蒙特卡洛仿真由于较高的建模精度和较低的实现复杂度而被广泛使用^[10-11]。在空域, 光子的空间特性对 UWOC 系统的指向性和鲁棒性评估也非常重要, 该特性也可以由蒙特卡洛仿真方法模拟光子的传播得到^[12]。此外, 多光源链路配置可以利用空间分集增益或复用增益提高 UWOC 系统的可靠性和吞吐量^[13-16]。然而, 目前对 UWOC 链路空间信道的研究多集中在单

光源场景, 对多输入多输出 (multiple-input multiple-output, MIMO) 场景下光子空间特性的研究很少。

针对上述问题, 本文提出了一种适用于 MIMO UWOC 系统的空间信道建模方案, 利用加权指数函数多项式 (weighted exponential function polynomial, WEPF) 建模 MIMO UWOC 链路接收端的光子辐照度空间分布闭合表达式。数值结果表明, 本文提出的 WDEP 模型与浑浊水环境中的蒙特卡洛仿真结果高度吻合。

1 UWOC MIMO 系统模型

1.1 光源模型

本文考虑包括沿岸水域和港口水域在内的浑浊水环境, 并选择激光二极管 (laser diode, LD) 作为光源。LD 具有功率密度高、发散角小的特性, 适用于浑水链路^[12]。单模 LD 的发射光束可以假设为基模高斯 TEM₀₀ 光束, 其辐照度分布可以表示为^[17]:

$$I(r, L) = I_0 \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega^2(L)}\right) = \frac{2P}{\pi\omega^2(L)} \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega^2(L)}\right) \quad (1)$$

其中, I_0 为轴向光强, P 为光功率, r 是从观察点到接收平面中心的偏移, L 是链路距离, 函数 $\omega(L)$ 用来描述光束沿传播距离的改变, 可以表示为:

$$\omega(L) = \omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda L}{\pi\omega_0^2}\right)^2} \quad (2)$$

其中, ω_0 是 $L = 0$ 处的光斑尺寸半径, λ 是光源波长。

1.2 海水的光学特性

光子在海水传播期间会受吸收和散射的影响^[18]。吸收由浮游植物、水分子和其他粒子引入, 将导致光子的能量以热能形式散失; 散射将改变每个光子的发射方向, 使得接收器捕获的光子减少, 这也会导致能量损失。吸收和散射引起的非散射光能量损失分别由吸收系数 $a(\lambda)$ 和散射系数



$b(\lambda)$ 表示, $c(\lambda)$ 定义为衰减系数, 它描述了吸收和散射效应对能量损失的总体影响, 由吸收系数和散射系数直接相加获得, 即:

$$c(\lambda) = a(\lambda) + b(\lambda) \quad (3)$$

其中, 散射系数 $b(\lambda)$ 可以表示为:

$$b(\lambda) = 2\pi \int_0^\pi \tilde{\beta}(\theta, \lambda) \sin \theta d\theta \quad (4)$$

其中, $\tilde{\beta}$ 是体积散射函数 (volume scattering function, VSF), 被定义为光从体积 ΔV 上散射到方向 θ 上的立体角 $\Delta\Omega$ 的光散射极限 ($\Delta V \rightarrow 0, \Delta\Omega \rightarrow 0$) [19]。利用 $b(\lambda)$ 对 VSF 进行归一化处理, 可以得到散射相函数 (scatter phase function, SPF) $\beta(\theta, \lambda)$, 即:

$$\beta(\theta, \lambda) = \frac{\tilde{\beta}(\theta, \lambda)}{b(\lambda)} \quad (5)$$

SPF 将散射角度的概率表示为概率密度函数, 该函数将在后文中用于选择蒙特卡洛仿真的散射角。本文关注光子在水下衰减相对较小的蓝绿光波段的传输, 为了表述方便, 选定 $\lambda = 532 \text{ nm}$ 并在后文中省略参数 λ 。Henyey-Greenstein 函数通常用于描述浑浊介质的 SPF [18], 其表达式为:

$$\beta(\theta) = \frac{1 - g^2}{4\pi(1 + g^2 - 2g \cos \theta)^{\frac{3}{2}}} \quad (6)$$

其中, θ 是散射角, g 是 θ 的平均余弦。浑浊水中链路特性参数见表 1。

表 1 浑浊水中链路特性参数

水质	a/m^{-1}	b/m^{-1}	c/m^{-1}	g
沿岸水	0.179	0.219	0.398	0.947 0
港口水	0.295	1.875	2.170	0.919 9

1.3 MIMO 链路几何模型

线性阵列 MIMO UWOC 链路几何模型如图 1 所示, N 个光源在 x 轴上对称排列成一个线性阵列 (原点处不设置光源), 光源之间的距离为阵元间距 d 。接收平面与 xoy 平面相平行, 它们之间的垂直距离为链路距离 L , 接收机平面 x' 轴上分布有 N 个接收机 (探测器), 每个接收机对应一个光源, 接收机之间的距离可以根据需要调整。每个光源的仰角都可调节, 并指向接收机的中心, 如图 1 所示, 这里的仰角表示主光轴和接收平面法线的夹角。

为了描述光子的空间分布, 本文将每个接收机平面都分成许多宽度为 Δr 的同心圆, 接收平面的空间划分如图 2 所示。接收机上半径 r 处的圆环面积可以由 $\pi(r + \Delta r)^2 - \pi r^2$ 计算。随后, 将圆环上的光子数除以圆环的面积, 得到接收平面的辐照度分布。最后, 对辐照度结果进行归一化处理, 可以得到接收平面的归一化辐照度, 用来描述光子在接收平面的空间分布。

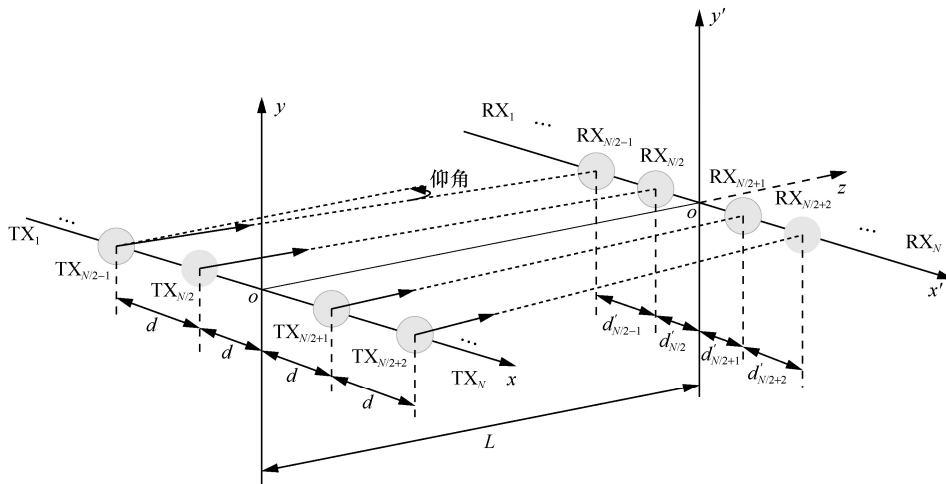


图 1 线性阵列 MIMO UWOC 链路几何模型

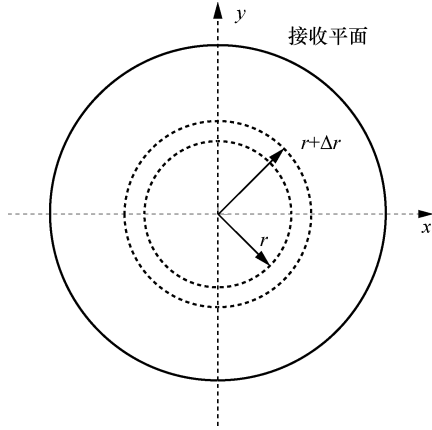


图2 接收平面的空间划分

2 空间信道建模方案

2.1 蒙特卡洛仿真算法

蒙特卡洛仿真算法采用随机模拟的方法生成大量光子,通过模拟每个光子和水下粒子的相互作用评估水下信道特性。本文对单光源 UWOC 链路的蒙特卡洛仿真算法^[18]加以改进,并以此研究 MIMO UWOC 链路信道特性。蒙特卡洛仿真算法的基本规则总结如下:开始时,一组光子以特定的初始方向从光源发射,光子在介质中的吸收和散射可以通过改变每个光子的基本参数模拟,当光子到达接收机时,记录每个光子的基本参数,通过对这些参数的统计分析,可以得到光子的空间特性。

蒙特卡洛仿真的具体流程主要包括3个部分:初始条件、光子传播和光子接收^[19]。每个光子的基本参数包含传播时间、发射方向、位置和权重。光子在直角坐标系中的初始位置为(0,0,0),初始权重为1。由式(1)可得,光子发射半径的概率分布为:

$$\Pr\{r \leq R\} = \int_0^R \frac{I(r,0)}{P} 2\pi r dr = 1 - \exp\left(-\frac{2R^2}{\omega_0^2}\right) \quad (7)$$

因此,光源处光子发射的初始半径可以表示为:

$$r_0 = \frac{\omega_0}{\sqrt{2}} \sqrt{-\ln(1-\mathcal{R})} \quad (8)$$

其中, $\mathcal{R}$ 是在区间[0,1]上均匀分布的随机变量。每个光子的初始位置和传播方向由天顶角 θ_s 和方位角 ϕ_s 确定,这里 θ_s 为光子方向与 z 轴的夹角, ϕ_s 为光子方向在 xoy 平面上的投影与 x 轴的夹角。初始方位角 ϕ_0 是均匀分布在区间 $[0, 2\pi]$ 上的随机变量,初始天顶角 θ_0 可以表示为:

$$\theta_0 = \frac{r_0 \theta_{\text{div}}}{2\omega_0} \quad (9)$$

其中, θ_{div} 为 LD 光源的发散角。综上,光子在发射平面上的初始位置 (x_0, y_0) 可以表示为:

$$\begin{cases} x_0 = r_0 \cos \phi_0 \\ y_0 = r_0 \sin \phi_0 \end{cases} \quad (10)$$

此外,初始方向余弦 (μ_x, μ_y, μ_z) 可以表示为:

$$\begin{cases} \mu_x = \sin \theta_0 \cos \phi_0 \\ \mu_y = \sin \theta_0 \sin \phi_0 \\ \mu_z = \cos \theta_0 \end{cases} \quad (11)$$

每个光子传播的过程中会与介质发生相互作用,随后会随机移动一段距离,该距离可以表示为:

$$\Delta s = -\ln \xi_s / c \quad (12)$$

其中, ξ_s 是均匀分布在区间[0,1]上的随机变量。光子权重的更新方法可以表示为:

$$W_{n+1} = \left(1 - \frac{a}{c}\right) W_n \quad (13)$$

其中, W_{n+1} 是发生相互碰撞之后的更新权重, W_n 是发生碰撞之前的权重。传播过程中,散射引起的光子方向变化可以由天顶角 θ_s 和方位角 ϕ_s 描述,可以计算为:

$$\begin{cases} \xi_\theta = 2\pi \int_0^{\theta_s} \beta(\theta) \sin \theta d\theta \\ \phi_s = 2\pi \xi_\phi \end{cases} \quad (14)$$

其中, ξ_θ 和 ξ_ϕ 都是均匀分布在区间[0,1]上的随机变量; $\beta(\theta)$ 是式(6)中的 SPF。需要注意的是,计算得到的 θ_s 和 ϕ_s 是相对于向前方向的相对旋转角度,因此需要将该角度转换到绝对坐标系并更



新方向余弦。

在接收端，本文仅选择位置在接收孔径内、天顶角小于接收视场角（field of view, FOV）的一半且权重高于一定阈值的光子作为有效光子。在本文中，光子的权重阈值设置为 10^{-6} 。最后，通过分析接收平面的辐照度分布可以得到 MIMO UWOC 链路的空间特性。

2.2 加权指数函数多项式模型

在 UWOC 中，本文采用衰减长度 $\delta = c(\lambda)L$ 表示受海水类型和链路距离联合影响的光工作区^[20-21]。本文主要关注沿岸水域和港口水域的空间信道特性，其中多重散射占主导地位，且 δ 值相对较大。

本节提出了一个半解析模型 WEFP 拟合蒙特卡洛仿真的结果，该模型是一个具有待定系数的闭合形式表达式。首先，从 2×2 MIMO UWOC 系统开始，推导出具有任意数量的光源和探测器的通用 MIMO UWOC 系统的空间信道模型。

如图 1 所示， $N = 2$ 代表 2×2 MIMO 情况，由于接收机位置的对称性，本文仅对接收机 RX_1 进行分析。容易发现， RX_1 接收平面上的光子可以分为两部分：第一部分为发射机 TX_1 发射到接收平面上的光子，由于 TX_1 的发射方向指向 RX_1 接收平面中心，因此该部分光子为 RX_1 接收平面光子的主要部分；第二部分为发射机 TX_2 的空间色散效应对 RX_1 的干扰，虽然 TX_2 的发射方向指向 RX_2 接收平面中心，但由于海水的散射效应，会有少部分光子落在 RX_1 接收平面边缘，造成邻道干扰，该部分光子为 RX_1 接收平面光子的次要部分。基于此思想，根据式 (1)，本文提出了 2×2 MIMO 系统接收机平面不同半径 r 处辐照度分布的闭合表达式：

$$S_{2 \times 2}(r) = A \exp(-Br^\alpha) + C \exp[-D(r-\tau)^\beta] \quad (15)$$

其中，两个指数函数项分别表示 2×2 MIMO 系统中两个 LD 光源对辐照度的贡献； $(A, B, C, D,$

$\alpha, \beta, \tau)$ 为待定系数，其中 τ 用来表示相邻信道干扰的影响。基于式 (15)，本文将模型从 2×2 MIMO 系统推广到更一般的 MIMO 系统，得到更一般的空间信道模型。

在 $N \times N$ MIMO 系统中， N 个发射机各自指向对应的接收机中心，因此对于每一个接收机 RX_i ($1 \leq i \leq N$)，其接收平面上的辐照度分布都可以视作 1 个主要部分和 $(N-1)$ 个次要部分的组合，因此，接收机 RX_i 的接收平面不同半径 r 处辐照度分布可以由 WEFP 表示为：

$$S_{\text{MIMO}}(r) = \sum_{j=1}^N S_j(r) = \sum_{j=1}^N A_j \exp[-B_j(r-\tau_j)^{\alpha_j}] \quad (16)$$

其中， N 是光源数量； $S_j(r)$ 是第 j 个光源对辐照度的贡献； $\Omega_j = (A_j, B_j, \alpha_j, \tau_j)$ 是用于调整第 j 个发射机的权重系数，当 $j = i$ 时， $\tau_j = 0$ 。参数集 $(\Omega_j)_{j=1}^N$ 的值可以基于非线性最小二乘准则计算：

$$(\Omega_j)_{j=1}^N = \arg \min \left(\int [S_{\text{MIMO}}(r) - S_{\text{MC}}(r)]^2 dr \right) \quad (17)$$

其中， $S_{\text{MC}}(r)$ 为第 2.1 节中得到的信道空间特性的蒙特卡洛仿真结果。式 (17) 中的所有参数集都可以使用 MATLAB 通过曲线拟合一次性求解。

需要注意的是，当图 1 中光源的仰角均为 0° 时，对于每一个光源，其发射主光轴均与接收平面法线重合（即 $d = d'$ ）。在单输入单输出（single input single output, SISO）UWOC 系统中，先前的研究^[7]已经求解了接收平面辐照度分布的闭合表达式为：

$$S_{\text{SISO}}(r) = A \exp(-Br^\alpha) + D \exp(-Er) \quad (18)$$

其中， (A, B, C, D, E, α) 为待定系数。当所有光源的仰角均为 0° 时，来自所有光源的光束都垂直于对应的接收平面，并且每个光源到接收平面的距离都相同。因此，每个光源在接收平面上都具有完全相同的辐照度分布，只是由于发射机位置不同，每个光源辐照度分布的位置偏移不同。在该情况下，接受平面任意位置处的辐照度可以通过

修改后的 WEPF 表示为:

$$S_{\text{EL}0}(x, y) = \sum_{j=1}^N S_{\text{SISO}}^j(r_j) = \sum_{j=1}^N [A^j \exp(-B^j r_j^{\alpha_j}) + D^j \exp(-E^j r_j)] \quad (19)$$

其中, $S_{\text{SISO}}^j(r_j)$ 是第 j 个光源对辐照度的贡献; $(\Psi_j)_{j=1}^N$ 是待定系数集; r_j 是接收平面上任意一点 (x, y) 与第 j 个光源位置坐标在接收平面上的投影点 (x_j, y_j) 间的距离, 可以表示为:

$$r_j = \sqrt{(x - x_j)^2 + (y - y_j)^2} \quad (20)$$

如上所述, 每个光源在接收平面上都具有完全相同的辐照度分布, 因此所有待定系数集 $(\Psi_j)_{j=1}^N$ 的值都相等, 并可利用与式 (17) 相同的算法求解。

3 仿真结果与分析

本节将利用数值结果验证提出的 WEPF 模型的有效性。前文已论证光源仰角为 0° 的情况是单光源场景的简单叠加, 因此在这里不再讨论。本文考虑每个光源都具有某一仰角的更通用的场景, 同时考虑任意数量的光源和探测器。

系统的几何结构如图 1 所示, 发射机阵列由 N 个波长为 532 nm 的 LD 光源构成, 发散角 θ_{div} 设置为 1.5×10^{-3} rad, 光束腰半径 ω_0 均为 1.414 mm。在蒙特卡洛仿真中, 每个光源发射 3×10^8 个光子以获得 $S_{\text{MC}}(r)$, 接收机的 FOV 为 180° 。本文考虑更常见的浑浊水质, 包括沿岸水和港口水。港口水更为浑浊, 其散射效应比沿岸水更明显。因此在港口水域的仿真中, 链路距离 L 分别设置为 5 m、10 m、15 m; 在沿岸水域的仿真中, 链路距离 L 分别设置为 30 m、35 m 和 40 m。不失一般性, 本文在每种链路距离下将 N 分别设置为 2、4 和 6, 即同时考虑 2×2 、 4×4 和 6×6 种 MIMO 配置。在上述 3 种 MIMO 配置下, 阵源间距 d 分别为 5 m、3 m 和 2 m, 接收机横坐标于光源横坐标之间的差均为 2 m。港口水中 MIMO

UWOC 链路的辐照度分布如图 3 所示, 沿岸水中 MIMO UWOC 链路的辐照度分布如图 4 所示, 每个接收机的分析方法相同, 这里只列出 RX_1 的仿真结果。

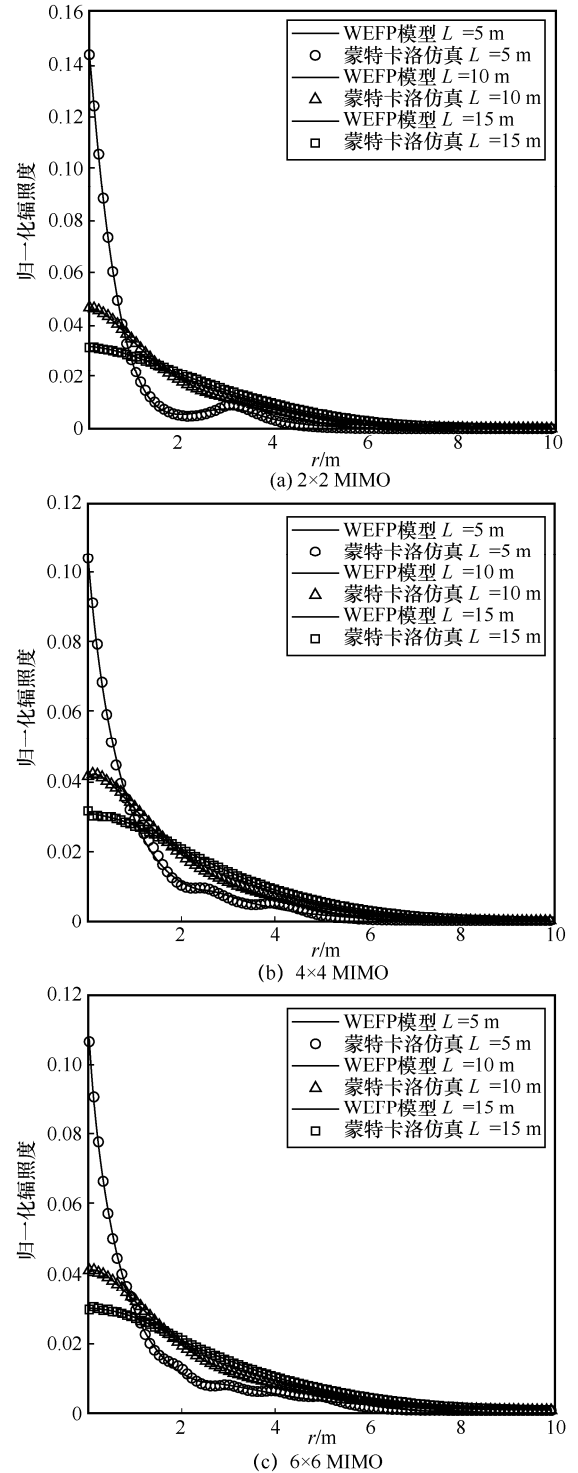


图3 港口水中 MIMO UWOC 链路的辐照度分布

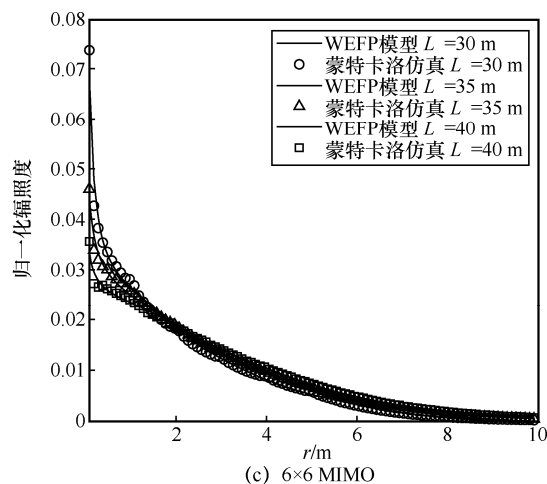
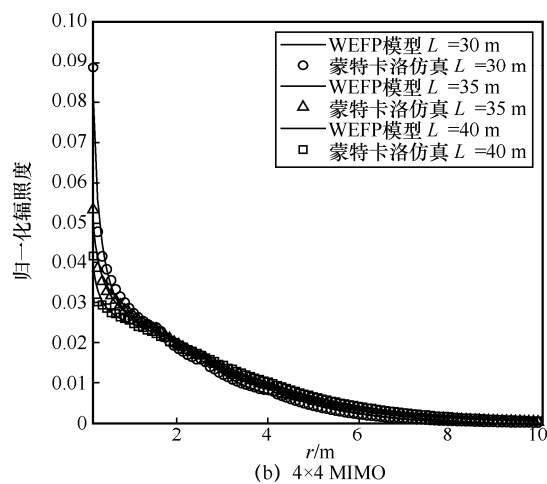
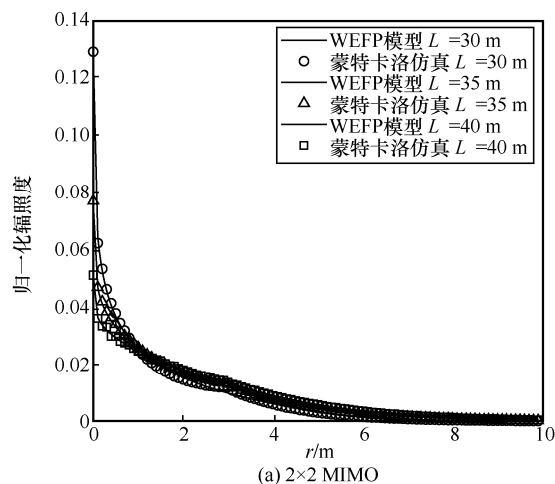


图4 沿岸水中 MIMO UWOC 链路的辐照度分布

图3和图4表明WEFP模型和蒙特卡洛空间信道仿真的结果高度吻合。图3说明在港口水的各种光源数量的MIMO配置下,归一化辐照度均随着偏移量 r 的增加而减小。同时可以看出,在

相同光源数量的MIMO配置下,随着链路距离的增加,接收端辐照度将降低,同时辐照度的分布将更加分散。这是因为对于更长的传播距离,光子将会与海水粒子发生更多的作用,产生多重散射,导致光子衰减更加严重和接收平面上的光子分布更加分散。在图4所示的沿岸水场景下,也可以观察到类似的结果,不同之处在于沿岸水的辐照度分散程度更小,空间色散现象较弱,这是因为沿岸水的散射效应更弱。

本文所提出的WEFP模型的RMSE结果见表2,显示了在不同链路配置下,WEFP模型所拟合的归一化辐照度的均方根误差(root mean square error, RMSE)。可以观察到每个场景下的RMSE结果都位于 10^{-4} 数量级。因此,可以得出结论,本文所提出的WEFP模型可以很好地模拟混浊水质中MIMO UWOC链路的辐照度分布。

表2 本文所提出的WEFP模型的RMSE结果

水质	MIMO 设置	链路距离/m	RMSE
港口水	2×2	5	4.736×10^{-4}
		10	1.982×10^{-4}
		15	1.288×10^{-4}
	4×4	5	6.024×10^{-4}
		10	5.120×10^{-4}
		15	1.990×10^{-4}
	6×6	5	5.805×10^{-4}
		10	2.789×10^{-4}
		15	1.654×10^{-4}
沿岸水	2×2	30	4.238×10^{-4}
		35	3.883×10^{-4}
		40	1.978×10^{-4}
	4×4	30	5.563×10^{-4}
		35	3.532×10^{-4}
		40	1.621×10^{-4}
	6×6	30	6.228×10^{-4}
		35	2.605×10^{-4}
		40	1.886×10^{-4}

4 结束语

本文研究了浑浊水环境下 MIMO UWOC 链路的空间特性,并提出了闭合形式的 WEPF 模型建模任意光源数量的 MIMO UWOC 链路接收平面的归一化辐照度分布。数值结果表明,所提出的 WEPF 模型在不同海水类型、光源数量和链路距离下,都与蒙特卡洛仿真结果吻合。 10^{-4} 数量级的 RMSE 结果表明该模型具有较高的精度。光源随机抖动场景下的 UWOC 空间信道建模方案将是笔者未来的工作。

参考文献:

- [1] 瞿逢重, 来杭亮, 刘建章, 等. 海洋物联网关键技术研究与应用[J]. 电信科学, 2021, 37(7): 25-33.
- [2] QU F Z, LAI H L, LIU J Z, et al. Research and application on key techniques of marine IoT[J]. Telecommunications Science, 2021, 37(7): 25-33.
- [3] SALCEDO-SERRANO P, BOLUDA-RUIZ R, GARRIDO-BALSELLS J M, et al. On the scattering-induced fading for optical wireless links through seawater: statistical characterization and its applications[J]. Optics Express, 2021, 29(23): 37101-37116.
- [4] ZHU L, YAO H P, WANG J J, et al. Channel modeling for orbital angular momentum based underwater wireless optical systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2022, 71(6): 5880-5895.
- [5] QADAR R, BIN QAİM W, NURMI J, et al. Effects of multipath attenuation in the optical communication-based Internet of underwater things[J]. Sensors, 2020, 20(21): 6201.
- [6] 于玄, 耿烜. 一种降低复杂度的压缩感知水声信道估计方法[J]. 电信科学, 2021, 37(3): 114-124.
- [7] YU X, GENG X. A reduced-complexity compressed sensing channel estimation for underwater acoustic channel[J]. Telecommunications Science, 2021, 37(3): 114-124.
- [8] YAHIA S, MERAIHI Y, RAMDANE-CHERIF A, et al. A survey of channel modeling techniques for visible light communications[J]. Journal of Network and Computer Applications, 2021(194): 1-31.
- [9] JARUWATANADILOK S. Underwater wireless optical communication channel modeling and performance evaluation using vector radiative transfer theory[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2008, 26(9): 1620-1627.
- [10] ILLI E, BOUANANI F E, PARK K H, et al. An improved accurate solver for the time-dependent RTE in underwater optical wireless communications[J]. IEEE Access, 2019(7): 96478-96494.
- [11] WANG X Z, ZHANG M L, ZHOU H Y, et al. Performance analysis and design considerations of the shallow underwater optical wireless communication system with solar noises utilizing a photon tracing-based simulation platform[J]. Electronics, 2021, 10(5): 632.
- [12] ZHANG H H, DONG Y H. General stochastic channel model and performance evaluation for underwater wireless optical links[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 15(2): 1162-1173.
- [13] DONG Y H, ZHANG H H, ZHANG X D. On impulse response modeling for underwater wireless optical MIMO links[C]//Proceedings of 2014 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC). Piscataway: IEEE Press, 2015: 151-155.
- [14] ZHANG S, ZHANG K, DONG Y H. A uniform spatial channel model for underwater wireless optical communication links[C]//Proceedings of GLOBECOM 2020 - 2020 IEEE Global Communications Conference. Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-6.
- [15] ZHANG H H, CHENG J L, WANG Z C, et al. On the capacity of buoy-based MIMO systems for underwater optical wireless links with turbulence[C]//Proceedings of 2018 IEEE International Conference on Communications (ICC). Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-6.
- [16] GELDARD C T, THOMPSON J, POPOOLA W O. A study of spatial and temporal dispersion in turbulent underwater optical wireless channel[C]//Proceedings of 2019 15th International Conference on Telecommunications (ConTEL). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-5.
- [17] WANG W, WANG P, PANG W N, et al. Evolution properties and spatial-mode UWOC performances of the perfect vortex beam subject to oceanic turbulence[J]. IEEE Transactions on Communications, 2021, 69(11): 7647-7658.
- [18] ZHANG H H, DONG Y H. Impulse response modeling for general underwater wireless optical MIMO links[J]. IEEE Communications Magazine, 2016, 54(2): 56-61.
- [19] WU D H, GHASSEMLOOY Z, MINH H L, et al. Improvement of the transmission bandwidth for indoor optical wireless communication systems using a diffused Gaussian beam[J]. IEEE Communications Letters, 2012, 16(8): 1316-1319.
- [20] TANG S J, DONG Y H, ZHANG X D. Impulse response modeling for underwater wireless optical communication links[J]. IEEE Transactions on Communications, 2013, 62(1): 226-234.
- [21] COX W C. Simulation, modeling, and design of underwater optical communication systems[D]. Raleigh: North Carolina State University, 2012.
- [22] COCHENOUR B M, MULLEN L J, LAUX A E. Characteriza-



tion of the beam-spread function for underwater wireless optical communications links[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2008, 33(4): 513-521.

- [21] ZHANG J, KOU L, YANG Y, et al. Monte-Carlo-based optical wireless underwater channel modeling with oceanic turbulence[J]. Optics Communications, 2020(475): 126214.

[作者简介]



刘晓谦（1999—），男，清华大学深圳国际研究生院硕士生，主要研究方向为水下无线光通信和下一代短距无线通信技术。



唐昕柯（1989—），男，鹏城实验室副研究员，主要研究方向为无线光通信、量子密钥分发、光纤通信等。



董宇涵（1979—），男，清华大学深圳国际研究生院副教授、鹏城实验室副研究员，主要研究方向为无线通信与网络、无线光通信、机器学习与优化等。