

【引用格式】孙若凡, 刘学蕊, 娄毅, 等. 分层纵向水下无线光信道建模研究[J]. 数字海洋与水下攻防, 2022, 5(4): 322-328.

分层纵向水下无线光信道建模研究

孙若凡^{1, 2, 3}, 刘学蕊^{1, 2, 3}, 娄毅^{1, 2, 3,*}, 乔钢^{1, 2, 3}

(1. 哈尔滨工程大学 水声技术重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 海洋信息获取与安全工信部重点实验室(哈尔滨工程大学) 工业和信息化部, 黑龙江 哈尔滨 150001;

3. 哈尔滨工程大学 水声工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 水下无线光通信 (Underwater Wireless Optical Communication, UWOC) 是水下物联网感知层的新兴技术之一。在感知层中, UWOC 技术常被用于支持数据的纵向上行传输。针对几何光学理论无法准确描述 UWOC 链路衰减的问题, 研究了基于 MIE 散射理论的纵向 UWOC 信道模型; 提出了分层的纵向海水介质模型, 在此基础上设计了一种利用蒙特卡洛仿真方法对 UWOC 纵向链路进行评估的方案。该方案考虑了收发装置空间位置的非对齐以及出现位置失配的情况, 通过该方案可求得 UWOC 链路冲激响应的数值结果, 研究成果对于 UWOC 设计具有重要意义。

关键词 水下无线光通信; 蒙特卡洛方法; 信道建模

中图分类号 TN929.1 **文献标识码** A **文章编号** 2096-5753(2022)04-0322-07

DOI 10.19838/j.issn.2096-5753.2022.04.007

Modeling of Hierarchical Vertical Underwater Wireless Optical Channel

SUN Ruofan^{1, 2, 3}, LIU Xuerui^{1, 2, 3}, LOU Yi^{1, 2, 3,*}, QIAO Gang^{1, 2, 3}

(1. Acoustic Science and Technology Laboratory, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;

2. Key Laboratory of Marine Information Acquisition and Security (Department of Industry and Information Technology), Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;

3. College of Underwater Acoustic Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract Underwater Wireless Optical Communication (UWOC) is one of the emerging technologies for the underwater IoT sensing layer. In the sensing layer, UWOC technology is often used to support the vertical uplink transmission of data. This paper investigates a vertical UWOC channel model based on MIE scattering theory to address the problem that geometric optical theory cannot accurately describe the UWOC link fading. A hierarchical vertical seawater medium model is proposed, based on which this paper designs a scheme for evaluating UWOC vertical links using Monte Carlo simulation methods. The scheme considers the non-alignment of the spatial position of the transceiver and the occurrence of position mismatch. This scheme can obtain the numerical results of the impulse response of the UWOC link. The results of the study are of great significance for UWOC design.

Key words underwater wireless optical communication; Monte Carlo method; channel modeling

收稿日期: 2022-06-14

作者简介: 孙若凡 (1996-), 男, 博士生, 主要从事水下无线光通信系统的性能分析研究。

*通信作者: 娄毅 (1987-), 男, 博士, 副教授, 主要从事高速水下光通信和全双工水声通信的研究。

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目“面向跨海面信息传输的两跳纵向水下无线光通信关键技术研究”(62101152)。

0 引言

水下物联网 (Internet of Underwater Things, IoUT) 是物联网的水下延伸, 被定义为通过数字设备使水下物体进行智能互联的水下设备网络。IoUT 为人类探索海洋环境提供了崭新的方式, 其应用场景包括海洋资源勘探、海洋环境检测、水下设备维护、军事防御等。IoUT 依网络构架可被划分为网络层、应用层以及感知层。其中感知层被应用于识别物体以及收集信息, 例如海底传感器、水下航行器、水下中继节点等。随着人类水下活动的日益频繁以及复杂化, 为了达到智能互联的目标, IoUT 对其感知层收集信息的效率提出了更高的要求, 对水下高性能通信技术的需求日益提升。

IoUT 感知层使用的水下无线通信技术主要包含 3 种: 水声通信、射频通信以及水下无线光通信 (UWOC) 技术。研究证明, 在短距离传输中, 与水声通信技术相比, UWOC 可以提供更高的数据速率, 而且功耗显著降低, 设备使用寿命更长。然而与水声通信类似, 当环境发生改变时, 被设计用于原水下环境的 UWOC 设备可能失效^[1-2]。因此在设计环节对 UWOC 进行预估是推动系统实际布放的关键。准确的 UWOC 信道模型是进行性能分析的基础。

目前 UWOC 建模的研究集中在水平及固定距离的链路上。在水平链路上, 光传播常被视作具有恒定衰减特性, 其信道衰减模型通常具有较为简单的数学形式。而在垂直链路中, 由于温度、压力、溶解物成分及浓度出现深度依赖性变化, 使得垂直链路的衰减特性并不恒定。近年来, 只有较少的纵向 UWOC 信道模型被提出。LOS 通信方面, 2018 年, ANOUS 首次对纵向 UWOC 信道进行了建模以及性能分析。ANOUS 将纵向信道近似为若干层的均匀信道, 应用几何光学理论, 将传播损失建模为指数衰减与分界面透射率乘积的形式^[3]。其后 ELAMASSIE 考虑了湍流对纵向链路的影响。在^[4-5]中, ELAMASSIE 分别计算了湍流衰落服从 Double-Gamma、对数正态分布情况下纵向链路传播损失表达式。此外, 在文献[6]中, 娄考虑了湍流衰落服

从对数-Gamma 分布时纵向链路的传播损失。以 Elamassie 的模型为基础, 2019 年, YILMAZ 首次对受对数正态分布湍流影响的多入多出 (MIMO) UWOC 系统的传播损失进行了建模^[7]。非视距通信 (NLOS) 方面, CHIRSTOPOULOU 对纵向链路中光束的覆盖面积进行了建模, 并考虑了接收机处于不同位置时 UWOC 信道传播损失^[8-9]。SAIT 实验验证了存在温度梯度和盐度波动时, 纵向 NLOS-UWOC 信道传播损失模型^[10]。最近, 为符合实际应用情况, Ji 提出了一种考虑湍流影响的斜光链路模型^[11]。尽管近年来已经有若干纵向链路的信道损失模型被提出, 但据调研, 大部分纵向链路研究均以几何光学理论为基础, 从波动光学角度解释光传播中的衰减。尚未有基于 MC 方法的纵向 LOS 链路模型被提出。与波动理论相比, MC 方法能够获得更多的信道信息。

本文的贡献包括:

1) 本文提出了基于 MC 方法的 LOS-UWOC 纵向链路传播损失模型。其中海洋介质被近似为多层水平的均匀介质, 假定介质中的粒子服从 MIE 散射理论。通过 MC 方法能够求得信道冲激响应, 为进一步研究高速通信情况下码间串扰的影响提供了基础。

2) 为使模型更符合实际情况, 本文考虑了收发装置非对准对纵向 UWOC 传播损失的影响。

1 系统和信道模型

1.1 系统模型

在实际水下应用中, 光通信常被用于数据的短距离上行传输, 例如水下节点与海面基站之间的通信。如图 1 所示, 水下存在一条纵向的上行 UWOC 链路。发射机是安装了高斯光源的水下传感器节点 U。接收机是被吊放在水面舰船底部的光电二极管 S。发射机及接收机的位置相对固定, 不发生主动位移。在图 1 所示 UWOC 系统中, 海水介质被近似为两层水平的介质, 其中每层介质均具有不随深度变化的恒定衰减特性。介质 I 的纵向距离为 L , 该层介质的吸收、散射及衰减系数分别为 $a(\lambda)$ $b(\lambda)$ $c(\lambda)$, 且 $c(\lambda)=a(\lambda)+b(\lambda)$, 其中 λ 是

光的波长。介质 II 的纵向距离为 L , 其吸收散射及衰减系数分别为 $a(\lambda)$, $b(\lambda)$, $c(\lambda)$ 。尽管水下光传播的衰减具有波长选择性, 但是在本文中波长并不是重点讨论的内容。因此下文论述中将忽视波长变化对衰减的影响, 仅考虑波长为 532 nm 时信道的衰减特性, 即 $\lambda = 532 \text{ nm}$ 。

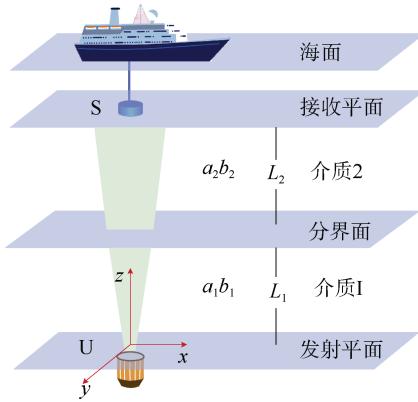


图 1 纵向 UWOC 链路的模型

Fig. 1 Model of vertical UWOC link

1.2 吸收与散射模型

1.2.1 吸收系数

海洋介质的吸收主要由海水中无机物的固有吸收以及溶解/悬浮有机物的吸收组成。HALTRIN 将海水的吸收建模为 4 种物质的共同作用^[12], 分别是纯水、黄腐酸、腐殖酸以及叶绿素的吸收作用。海水的吸收系数表示为

$$a(L) = a_w + a_f C_f(L) e^{-p_f \lambda_0} + a_h C_h(L) e^{-p_h \lambda_0} + a_c C_c(L)^{0.602} \quad (1)$$

式中: a_w 是纯水的吸收系数; a_f 是黄腐酸的吸收系数; a_h 是腐殖酸的吸收系数; a_c 是叶绿素的吸收系数; p_f 与 p_h 均是模型中的常数因子; L 是深度; $C_f(L)$, $C_h(L)$, $C_c(L)$ 分别表示黄腐酸、腐殖酸与叶绿素的浓度, 其中 $C_f(L)$, $C_h(L)$ 同时受深度及叶绿素浓度的影响。其关系为

$$\begin{aligned} C_f(L) &= 1.74098 C_c(L) \exp\left[0.12327 \left(C_c(L)/C_c^0\right)\right] \\ C_h(L) &= 0.19334 C_c(L) \exp\left[0.12343 \left(C_c(L)/C_c^0\right)\right] \end{aligned} \quad (2)$$

式中, C_c^0 是用于确定浓度量级的标准浓度, $C_c^0 = 1 \text{ mg/m}^3$ 。

在文献[13]中, YAP 考虑了纵向链路中叶绿素浓度对传播损失的影响, 并提出了叶绿素浓度表达式。

$$C_c(L) = C_{bg} + SL + \frac{C_{top}}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{L-L_{max}}{\sigma}\right)^2\right) \quad (3)$$

式中: C_{bg} 表示表面的背景叶绿素浓度; S 表示叶绿素浓度的垂直梯度; C_{top} 指高于背景水平的叶绿素总量; L_{max} 表示不同类型介质中叶绿素浓度出现最大值的深度, 此外 σ 是叶绿素浓度的标准差。不同水体的叶绿素分布特征已经在文献[14]中被研究。

1.2.2 散射系数

Haltrin 认为, 海水介质中的散射主要由 3 种物质共同作用, 分别是纯水、海水中的小微粒以及较大的微粒。折射率是区分微粒大小的参考, 通常认为折射率小于 1.03 的是小微粒, 大于 1.15 的是大微粒。海水的散射系数被表示为

$$b(L) = b_w + b_s C_s(L) + b_l C_l(L) \quad (4)$$

式中: b_w 是纯水的散射系数; b_s 和 b_l 分别指小微粒和大微粒的吸收系数; $C_s(L)$ 和 $C_l(L)$ 分别表示小微粒与大微粒的浓度, 其浓度与深度及叶绿素浓度有关。

$$\begin{aligned} C_s(L) &= 0.01739 C_c(L) \exp\left(0.11631 \left[C_c(L)/C_c^0\right]\right) \\ C_l(L) &= 0.76284 C_c(L) \exp\left(0.03092 \left[C_c(L)/C_c^0\right]\right) \end{aligned} \quad (5)$$

式(5)中, 3 种物质的散射系数由光的波长决定, 其表达式为

$$\begin{aligned} b_w(\lambda) &= 0.005826 (400/\lambda_0)^{4.322} \\ b_s(\lambda) &= 1.151302 (400/\lambda_0)^{1.7} \\ b_l(\lambda) &= 0.341074 (400/\lambda_0)^{0.3} \end{aligned} \quad (6)$$

1.2.3 衰减系数

如式(1)及式(4)所示, 海水的吸收与散射特性具有深度依赖性, 使得纵向链路的衰减特性并不恒定。为简化蒙特卡洛仿真的流程, 在本文中介质被近似成了 2 层均匀介质。因此为充分表示该层介质的衰减特性, 尽可能地降低图 1 所示假设引起的误差, 本文使用对应深度范围内衰减因子的平均

值表示该层均匀介质的衰减特性。以图1中的介质I为例, 其衰减特性为

$$\begin{aligned} a_1 &= \frac{1}{L_1} \int_{L_2}^{L_1+L_2} a(x) dx \\ b_1 &= \frac{1}{L_1} \int_{L_2}^{L_1+L_2} b(x) dx \end{aligned} \quad (7)$$

且 $a_1 + b_1 = c_1$ 。

同理, 介质II的衰减特性也可用相同的积分方法得到。

1.3 散射相位函数

散射相位函数描述了光子与粒子碰撞后向不同角度散射的概率。由于 Henyey-Greenstein 散射函数(HG)能够与水中微粒的散射取得良好的近似, 因而被广泛应用于 UWOC 领域。HG 函数表示为

$$p_{\text{HG}}(\mu) = \frac{1 - g^2}{(1 + g^2 - 2g \cos(\mu))^{3/2}} \quad (8)$$

式中: $p_{\text{HG}}(\mu)$ 是与散射角有关的散射相位函数; g 是影响前向散射和后向散射程度的因子; μ 表示散射的方向, 取值范围为 $[0, 2\pi]$ 。文献[16]中列举了因子 g 、衰减系数 c 以及渐进辐射传递方程本征值 γ 的参考数据。其中渐进辐射传递方程本征值 γ 与衰减系数 c 的关系为

$$\gamma = \frac{k_w}{c} \quad (9)$$

式中: k_w 是介质的扩散衰减系数, 该值表示了距离随辐照度的变化。

2 蒙特卡洛仿真

MC 方法是一种经典概率方法。该方法能够模拟介质中每个光子运动, 记录光子的运动轨迹, 最后可通过统计学方法求得信道的冲激响应函数, 并计算出信道传播损失。但从微观领域解释光通信时, MC 方法存在一定缺陷, 即不能解释一部分波动现象, 例如全内反射等几何光学理论。尽管近年来已有若干关于光子在折射面处运动的研究, 但相关理论仍存在一定争议。

在本文中 MC 方法以 MIE 散射理论作为基础。将光子的散射描述为光子与介质中粒子的弹性碰

撞。由于光子的碰撞是弹性的, 不会改变光子的能量, 因此本文假设光束的波长保持恒定。MC 方法将光子的吸收表示为光子以一定概率被粒子“截停”。此外, 由于偏振光在具有散射性质的介质中传播时会失去其偏振态, 因此本文忽视了光束传播中的偏振现象, 并假定介质中的光是完全非偏振的。

文献[19]使用 MC 方法对完全对齐的横向 LOS-UWOC 进行了仿真。UWOC 的 MC 仿真可被分为 3 个模块: 光子的初始状态、光子的传播、光子的接收。

2.1 光子的初始状态

如图1所示, 在发射平面处建立三维笛卡尔坐标系。 x , y 轴均位于水平的初始发射面上; z 轴垂直于初始发射面, 指向海面。当 UWOC 中发射机采用高斯光源时, 在初始发射面上, 光子的初位置分布是以镜头中心为中点的高斯分布。光子初位置距中心的距离 r_0 为^[16]

$$r_0 = w_s \sqrt{-\ln(1-\zeta)} \quad (10)$$

式中: w_s 是光束的束腰; ζ 是服从 $[0, 1]$ 之间均匀分布的随机变量。光子初始方向的方位角 φ_0 服从 $[0, 2\pi]$ 的均匀分布。光子初始运动方向的天顶角为

$$\theta_0 = \frac{r_0}{f_s} \quad (11)$$

式中: f_s 是发射机透镜的焦距, $f_s = w_s / \tan(\theta_s)$; θ_s 是光束的扩散角的半角。

考虑 UWOC 中收发机非对齐的情况。初始发射面的法向量平行于 z 轴正向, 因此只需将初始发射面转动天顶角 θ_t 以及方位角 φ_t , 即可使实际发射面的法向量指向空间中任意位置。以上转动过程相当于将发射机先绕 z 轴转动 φ_t , 再绕 y 轴为转动 θ_t 。

2.2 光子的传播

在文献[16]中, 光子的传播流程已被讨论。光子新的运动方向可以通过体积散射函数描述。

$$\zeta = \int_0^{\theta'} \tilde{\beta}(\theta) \sin \theta d\theta \quad (12)$$

式中: ζ 是服从 $[0, 1]$ 均匀分布的随机数; θ' 是散射的最大散射角。这个方程依赖于体积散射函数的积分来形成一个累积分布函数(CDF)。由于海水

的体积散射函数没有解析表达式, 因此只能对方程进行数值计算。针对这一问题, Haltrin 提出了几种近似于模拟天然水介质中散射函数的经验解。

光子在与介质粒子碰撞前的光路长度 l , 可以通过累积分布函数求得。

$$P_l(l) = 1 - e^{-l} \quad (13)$$

式中, $P_l(l)$ 是 $[0, 1]$ 均匀分布的随机数, 描述了光子在 2 次散射事件间中继续运动光路 l 的概率; 光路长度 l 是衰减系数与光子单次实际运动距离的乘积 $l = cr$ 。由以上关系求得光子单次实际运动距离 r 为

$$r = -\frac{1}{c} \log P_l(l) \quad (14)$$

上文提到, 吸收主要表现形式为光子为粒子截停。然而若对每个光子的每一步运动均判决是否被吸收, 则会极大地增加 MC 仿真的计算量。针对这一问题, COX 提出了光子权重的概念, COX 将 MC 仿真中的光子视作是初始值为 1 的光子团, 在光子团与介质例子发生碰撞后, 光子团中有 a/c 的光子被吸收, 有 b/c 。因此在发生碰撞后, 剩余光子团将乘以一个权值, 以表示光子团中剩余光子数, 该权值被称为反照度 $\omega = b/c$ ^[16]。

基于 MIE 散射理论, 当光子在介质中传播时, 在未发生碰撞时, 光子仍保持匀速直线运动。因此如图 2 所示, 尽管光子已经穿越了 2 种介质宏观上的分界面, 但由于光子在穿越界面过程中未与介质中的粒子发生碰撞, 因此光子将保持直线运动, 直至其与介质 II 中的粒子再度发生碰撞。

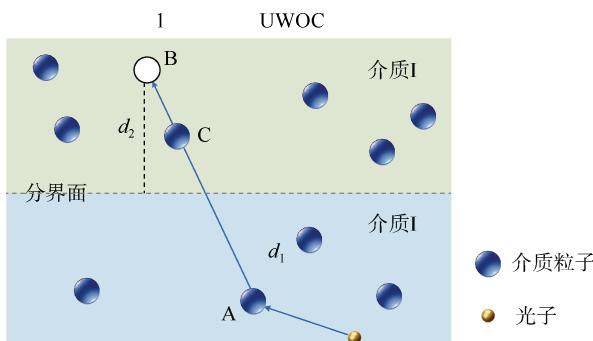


图 2 光子在分界面处的传播

Fig. 2 Propagation of photons at interface

由式(14)可知, 光子在 2 次散射之间的随机运动距离与介质衰减系数有关。当衰减系数 c 增加时, 光子运动距离的期望随之降低。如图 2 所示, 一个光子在介质 I 内 A 点处与粒子发生碰撞, 算得直至下次碰撞前的直线运动距离为 $r_1 = -\log(P_l^1)/c_1$, 其中 P_l^1 是 $[0, 1]$ 之间的常数。在经过 r_1 距离后, 光子将运动到介质 II 中的 B 位置。然而, 由于光子在 2 种介质中发生碰撞的概率不同, 光子可能运动到 C 位置即发生碰撞。为补偿光子穿介质后运动路径的变化, 本文将 MC 过程中光子穿界面时的随机运动距离设置为

$$r_0 = \kappa r_1 + (1 - \kappa)r_1 \frac{c_1}{c_2} \quad (15)$$

式中, $\kappa = d_1/(d_1 + d_2)$, d_1 与 d_2 分别是 A 点与 B 点到分界面的距离, 该值可在 MC 仿真过程中对光子位置进行追踪得到。

2.3 光子的接收

MC 仿真跟踪了每一个光子的运动状态, 能够记录光子的路径、运动时间、入射位置、入射角度、权重等数据。当光子到达接收面后, 接收机会根据光子的运动状态进行 2 项判决, 分别是光子入射角时候小于接收机视场角, 以及光子入射位置是否在接收机上。

$$\text{FOV}/2 \geq \theta_i \quad (16)$$

$$D_R \geq \sqrt{(x^e - x^i)^2 + (y^e - y^i)^2 + (z^e - z^i)^2} \quad (17)$$

式中: θ_i 是光子入射方向与接受面法线的夹角。FOV 是视场角的全角; D_R 表示接收机镜头的半径; (x^i, y^i, z^i) 是光子到达接收平面的位置, (x^e, y^e, z^e) 是接收机镜头中心的位置。文献[15]详细介绍了 MC 仿真中信道冲激响应的获取方法。

3 仿真结果与讨论

本节展示了 MC 仿真结果, 通过统计学方法计算了 UWOC 链路的传播损失。表 1 展示了 MC 仿真涉及的部分参数。

图 3 展示了在 S2 以及 S5 水体中, 散射、吸收、衰减系数以及反照度随深度的变化。由图可知, 在 2 种水体中, 随着深度的增加, 衰减系数总体上都

会逐渐降低。但在某一深度均会出现衰减系数的峰值。例如在 S2 水体中, 95 m 处衰减系数达到峰值。而在 S5 水体中, 峰值位于 45 m 处。这是因为在 HALTRIN 提出的衰减系数经验公式中, 衰减正比于水体中的叶绿素含量。因此在叶绿素峰值附近, 衰减系数最大。

表 1 MC 仿真的参数
Table 1 Parameters of MC simulation

名称	值	名称	值
光子数	8×10^6	光束发散角	10°
光源波长/nm	532	束腰宽度/m	0.003
接收机孔径/cm	50	纯水吸收系数/(m^2/mg)	0.051
黄腐酸吸收系数/(m^2/mg)	35.96	腐殖酸吸收系数/(m^2/mg)	18.83
常数因子 k/nm	0.019	常数因子 k/nm	0.011
叶绿素分布	[S, S]	背景叶绿素浓度	[0.08, 0.21]
浓度垂直梯度	$[-0.26, -1.03] \times 10^{-3}$	总叶绿素浓度	[13.89, 15.35]
浓度峰值的深度/m	[92.01, 46.61]	浓度的标准差	[5.55, 5.19]

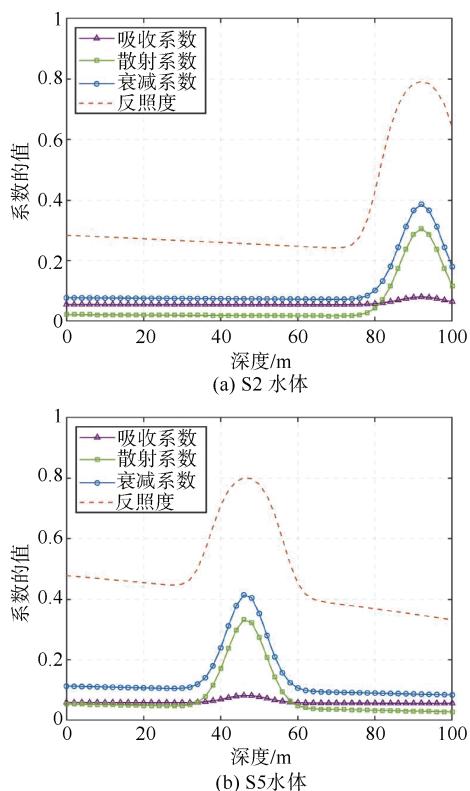


图 3 叶绿素浓度呈 S2 与 S5 分布时, 衰减系数随深度的变化

Fig. 3 When concentration of chlorophyll is S2 and S5, attenuation coefficient changes with depth

根据图 3 所示的衰减系数分布对介质进行分层。在 S2 分布的水体中, 令发射机位于水下 100 m 深度, 接收机被吊放在 40 m 深度, 收发装置完全对齐。在图 4 展示了通过 MC 方法求得的 UWOC 冲激响应数据。在图 4 所示 S2 介质中。均假设介质 I 距离 $L = 20$ m, 介质 II 距离 $L = 40$ m。每层介质衰减系数的平均值由式(7)计算得到。考虑假设介质 I 与介质 II 中溶解物成分相同以及成分不同的情况。分别使 2 层介质的 HG 因子均为 0.93 以及 0.93&0.8。图 4 S5 水体中的额 UWOC 中 $L = 40$ m, $L = 20$ m。由图可知, 当介质中的微粒的前向散射减弱, 后向散射增强时, UWOC 信道的冲激响应将出现时间扩展。

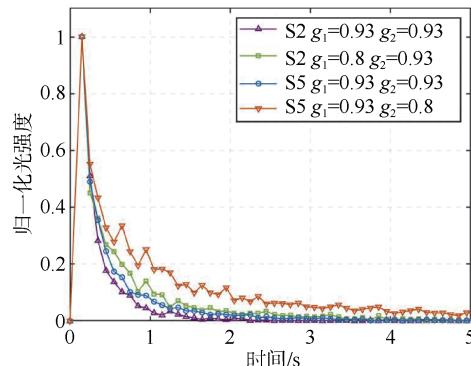


图 4 叶绿素浓度呈 S2 与 S5 分布时, 双层 UWOC 信道的冲激响应

Fig. 4 Impulse response of two-layer UWOC channel with S2 and S5 distribution of chlorophyll concentration

图 5 描述了在穿越 2 层介质后, 接收机接收到光信号强度随发射机天顶角偏转角度的变化。由于 UWOC 采用了高斯光源, 该光源围绕其轴线呈中心对称。因此在讨论发射机偏转对接收功率的影响时, 可以忽略位角的影响。图 5 中的 4 条曲线分别采用与图 4 相同的信道参数。由图可知, 在信道质量较好的链路中, 随着发射机出现偏转, 接收信号的光功率会显著降低。而在信道质量较差的信道中, 接收光功率的衰减相对平缓。图 5 中, 当方位角偏转到 18° 时, 4 条信道的接受光功率几乎重合。对于散射作用较为强烈的信道, 由于抵达接收面的光子中散射光子所占的比例更高, 一定程度上放宽了该信道对收发机对齐的要求。

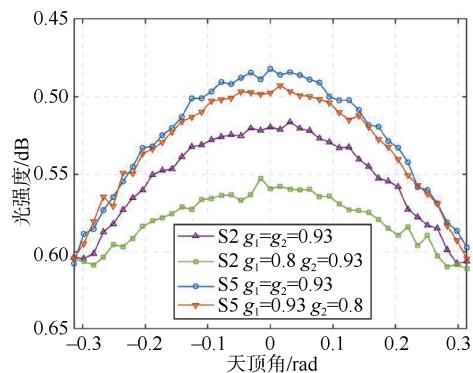


图 5 不同水体条件下, 接收光强度随发射机天顶角的变化

Fig. 5 Received light intensity varies with zenith Angle of transmitter under different water conditions

4 结束语

本文首次提出了纵向 UWOC 链路的 MC 仿真方法, 通过该方法可获取多层纵向 UWOC 链路的信道冲击响应曲线以及信道衰减数据。此外本文还考虑了发射机存在角度偏转情况下 UWOC 链路的信道衰减。本文研究成果对于 UWOC 链路设计具有重要意义, 能够有效推动纵向 UWOC 系统物理实现。

参考文献

- [1] 殷敬伟, 惠俊英, 郭龙祥. 点对点移动水声通信技术研究[J]. 物理学报, 2008 (3): 1753-1758.
- [2] YANG M, LI X K, MENG X X. Characteristic analysis of underwater acoustic scattering echoes in the wavelet transform domain[J]. 船舶与海洋工程学报(英文版) 2017 (1): 93-101.
- [3] ANOUS N, ABDALLAH M, UYSAL M, et al. Performance evaluation of LOS and NLOS vertical inhomogeneous links in underwater visible light communications[J]. IEEE Access, 2018, 6: 22408-22420.
- [4] ELAMASSIE M, UYSAL M. Performance characterization of vertical underwater VLC links in the presence of turbulence[C]// 2018 11th International Symposium on Communication Systems, Networks & Digital Signal Processing (CSNDSP). Budapest: IEEE, 2018.
- [5] ELAMASSIE M, SAIT S M, UYSAL M. Underwater visible light communications in cascaded gamma-gamma turbulence[C]// 2018 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps). Abu Dhabi: IEEE, 2018.
- [6] LOU Y, CHENG J L, NIE D H, et al. Performance of vertical underwater wireless optical communications with cascaded layered modeling[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2022, 71 (5): 5651-5655.
- [7] YILMAZ A, ELAMASSIE M, UYSAL M. Diversity gain analysis of underwater vertical MIMO VLC links in the presence of turbulence[C]// 2019 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom). Sochi: IEEE, 2019.
- [8] CHRISTOPOULOU C, SANDALIDIS H G, VAVOULAS A. Optimal trade-off between depth and coverage for a vertical UWOC link[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2020, 32 (4): 208-211.
- [9] CHRISTOPOULOU C, SANDALIDIS H G, VAIOPoulos N. Performance of an underwater optical wireless link with a randomly placed or moving receiver[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2020, 46 (3): 1068-1079.
- [10] SAIT M, GUO Y, ALKHAZRAGI O, et al. The impact of vertical salinity gradient on non-line-of-sight underwater optical wireless communication[J]. IEEE Photonics Journal, 2021, 13 (6): 1-9.
- [11] JI X Y, YIN H X, JING L Y, et al. Modeling and performance analysis of oblique underwater optical communication links considering turbulence effects based on seawater depth layering[J]. Optics Express, 2022, 30 (11): 18874-18888.
- [12] HALTRIN V I. Chlorophyll-based model of seawater optical properties[J]. Applied Optics, 1999, 38 (33): 6826-6832.
- [13] YAP Y X, JASMAN F, MARCUS T C E. Impact of Chlorophyll concentration on underwater optical wireless communications[C]// 2018 7th International Conference on Computer and Communication Engineering (ICCCE). Kuala Lumpur: IEEE, 2018.
- [14] JOHNSON L J, GREEN R J, LEESON M S. Underwater optical wireless communications: depth dependent variations in attenuation[J]. Applied Optics, 2013, 52 (33): 7867-7873.
- [15] HALTRIN V I. Theoretical and empirical phase functions for Monte Carlo calculations of light scattering in seawater[C]// Fourth International Conference on Remote Sensing for Marine and Coastal Environments. Orlando : Environmental Research Institute of Michigan, 1997.
- [16] COX W C. Simulation, modeling, and design of underwater optical communication systems[M]. Los Angeles: North Carolina State University, 2012.

(责任编辑: 张曼莉)