

非视距水下无线光通信传输信道脉冲响应特性研究

刘显月, 徐立君, 王晓华*

长春理工大学理学院, 吉林 长春

收稿日期: 2022年3月2日; 录用日期: 2022年3月15日; 发布日期: 2022年3月29日

摘要

非视距水下无线光通信利用光散射进行传输, 可以缓解视距水下无线光通信对准的要求。脉冲响应可以很好的反映水下无线光通信系统的信道性能。本文提出了一种基于指向概率法改进的非视距水下无线光通信传输信道模型, 基于此模型模拟了不同海水环境、不同收发机距离、不同波长对脉冲展宽的影响。仿真结果表明脉冲展宽效应随光波长的增大、海水浑浊度的减小、传输距离的减小而减小。文中所提出的非视距传输模型为水下非视距无线光通信传输信道特征描述提供了一种足够准确和现实的方法, 对分析和开发有效的水下无线光通信系统具有一定参考价值。

关键词

非视距, 水下无线光通信, 多次散射, 蒙特卡罗模拟, 脉冲展宽

Research on Impulse Response Characteristics of Underwater NLOS Wireless Optical Communication Transmission Channels

Xianyue Liu, Lijun Xu, Xiaohua Wang*

College of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun Jilin

Received: Mar. 2nd, 2022; accepted: Mar. 15th, 2022; published: Mar. 29th, 2022

*通讯作者。

文章引用: 刘显月, 徐立君, 王晓华. 非视距水下无线光通信传输信道脉冲响应特性研究[J]. 无线通信, 2022, 12(1): 1-11. DOI: 10.12677/hjwc.2022.121001

Abstract

Non-line-of-sight underwater wireless optical communication uses light scattering for transmission, which can alleviate the alignment requirements of line-of-sight underwater wireless optical communication. The impulse response can well reflect the channel performance of the underwater wireless optical communication system. In this paper, an improved non-line-of-sight underwater wireless optical communication transmission channel model based on the pointing probability method is proposed. Based on this model, the effects of different seawater environments, different transceiver distances, and different wavelengths on impulse response are simulated. The simulation results show that the pulse broadening effect decreases with the increase of light wavelength, seawater turbidity, and transmission distance. The proposed non-line-of-sight transmission model provides an accurate and realistic method for channel feature description of underwater non-line-of-sight wireless optical communication, which has a certain reference value for analyzing and developing an effective underwater wireless optical communication system.

Keywords

Non Line of Sight, Underwater Wireless Optical Communication, Multiple Scattering, Monte Carlo Simulation, Impulse Response

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着人类与海洋关系日趋密切,发展海洋经济、保护海洋环境已成当今社会发展的重点之一。然而海洋特殊的环境使实现水下无线通信较为复杂。与水声通信[1]、射频通信[2]相比,水下无线光通信(UWOC)因其调制带宽大、低延时、高能效和小尺寸收发器等优势成为水下无线通信的研究热点[3] [4] [5]。视距水下无线光通信可实现高数据速率和长距离通信,是目前主要研究的通信方式[6]。但在海洋湍流、收发机之间通信受阻等情况下,视距通信链路性能下降[7]。而非视距水下光通信(NLOS UWOC)利用散射光实现通信,其在浑浊海水环境中传输系统路径损耗小,是对收发机对准要求较低的新型水下无线光通信方式[8]。

NLOS UWOC 可通过水面光反射[9]或水中微小粒子光散射[10]实现通信。近些年来,对 NLOS UWOC 的研究主要集在信道仿真与实验验证两方面。Shlomi Arnon [11]等人证明了利用水面光反射实现 NLOS UWOC 的可行性。Tang [9]等人在 2013 年基于蒙特卡罗方法研究随机海面坡度对 NLOS UWOC 链路得影响,表明随着衰减长度的增加,当多重散射光在接收信号中占比较大时,散射光可以缓解表面坡度对接收信号的破坏。在实验方面,He Gui [12]等人演示了全反射角对 NLOS UWOC 链路的影响,表明在全反射角为 7° 时,可实现数据传输速率 300 Mbps、误码率 3.10×10^{-3} 的通信链路。

2014 年,VK Jagadeesh [10]等人基于蒙特卡罗方法和 Heney-Greenstein 模型研究了光子在不同海水环境、接收视场角下的非视距传输的过程,基于路径损耗分析水下系统的通信性能。并基于此模型比较视距和非视距模型的误码率,分析光波在不同海水环境中的传输距离[13]。Sun [14]等人利用 375 nm 紫外光在不同收发机几何形状、海水环境下进行 NLOS UWOC 实验,并与 405 nm 紫光对比通信系统性能,表

明在较小的仰角、较浑浊的海水环境和较短的波长下系统通信性能更好。基于这一实验基础，Sun [15] 等人基于 NRZ-OOK 调试方案研究了 377 nm 水下非视距通信系统在浑浊海水中的通信质量，实现了 85 Mbit/s、30 cm 的通信链路，并且当收发端平行放置时，也可实现 72 Mbit/s 的通信速率。

上述对 NLOS UWOC 的研究主要考虑接收机视场角大小对路径损耗的影响，而对于传输信道脉冲响应的研究较少，并且模拟的海水环境也较少，没有分别对四种海水环境进行模拟。针对上述问题，本文利用指向概率法改进的蒙特卡罗法建立的多次散射模型，系统的模拟了不同海水环境、不同收发机距离、不同传输波长下的非视距传输信道的脉冲响应。在现有研究的基础上，进一步证实了短波长、浑浊的海水环境可以增强非视距水下无线光通信传输信道性能。

2. 理论分析

2.1. 光在水中传输的数值研究

水中光能量衰减主要来自于悬浮颗粒及有机物质对光子的散射和吸收。用吸收系数 $a(\lambda)$ 和散射系数 $b(\lambda)$ 表示，衰减系数 $c(\lambda)$ 表示光能总衰减，表示为：

$$c(\lambda) = a(\lambda) + b(\lambda) \quad (2.1)$$

采用基于叶绿素浓度的模型表示给定波长下散射和吸收随水浊度的变化。总吸收和散射由水分子、悬浮颗粒、溶解盐及有机物质共同作用组成。表示为：

$$a(\lambda) = a_w(\lambda) + 0.06a_c^0(\lambda)C^{0.602} + a_f^0C_f \exp(-k_f\lambda) + a_h^0C_h \exp(-k_h\lambda) \quad (2.2)$$

$$b(\lambda) = b_w(\lambda) + b_s^0(\lambda)C_s + b_l^0(\lambda)C_l \quad (2.3)$$

其中 $a_w(\lambda)$ 为纯海水吸收系数、 $a_c^0(\lambda)$ 为叶绿素归一化吸收系数、 C_f 和 C_h 分别为黄腐酸和腐殖酸浓度； $b_w(\lambda)$ 为纯海水散射系数、 $b_s^0(\lambda)$ 和 $b_l^0(\lambda)$ 分别是小颗粒和大颗粒物散射系数、 C_s 和 C_l 是大小颗粒物浓度[16]。不同海水环境中叶绿素浓度如表 1 所示[16]。

Table 1. Chlorophyll concentrations in different seawater environments

表 1. 不同海水环境的叶绿素浓度

海水类型	叶绿素浓度(mg/m ³)
纯海水	0.005
大洋水	0.31
近岸海水	0.83
海港海水	5.9

光在水中传播遇到悬浮粒子后发生散射，根据散射角大小可分为前向散射及后向散射。当光子发生前向散射才有可能被接收机接收到。光子发生后向散射的概率大小为：

$$B = \frac{b_B}{b} \quad (2.4)$$

B 为后向散射概率、 b_B 为后向散射系数。

通过对公式(2.2)~(2.4)的数值模拟得出四类海水环境中不同波长的吸收系数、散射系数、后向散射概率如图 1 所示。由图 1(a)可以看出在低浊度(纯海水、大洋水、近岸海水)海水环境中，光波长在 400~580 nm 范围内吸收系数较小，均小于 0.2 m^{-1} 。而浊度较高的海港海水中吸收系数增大。

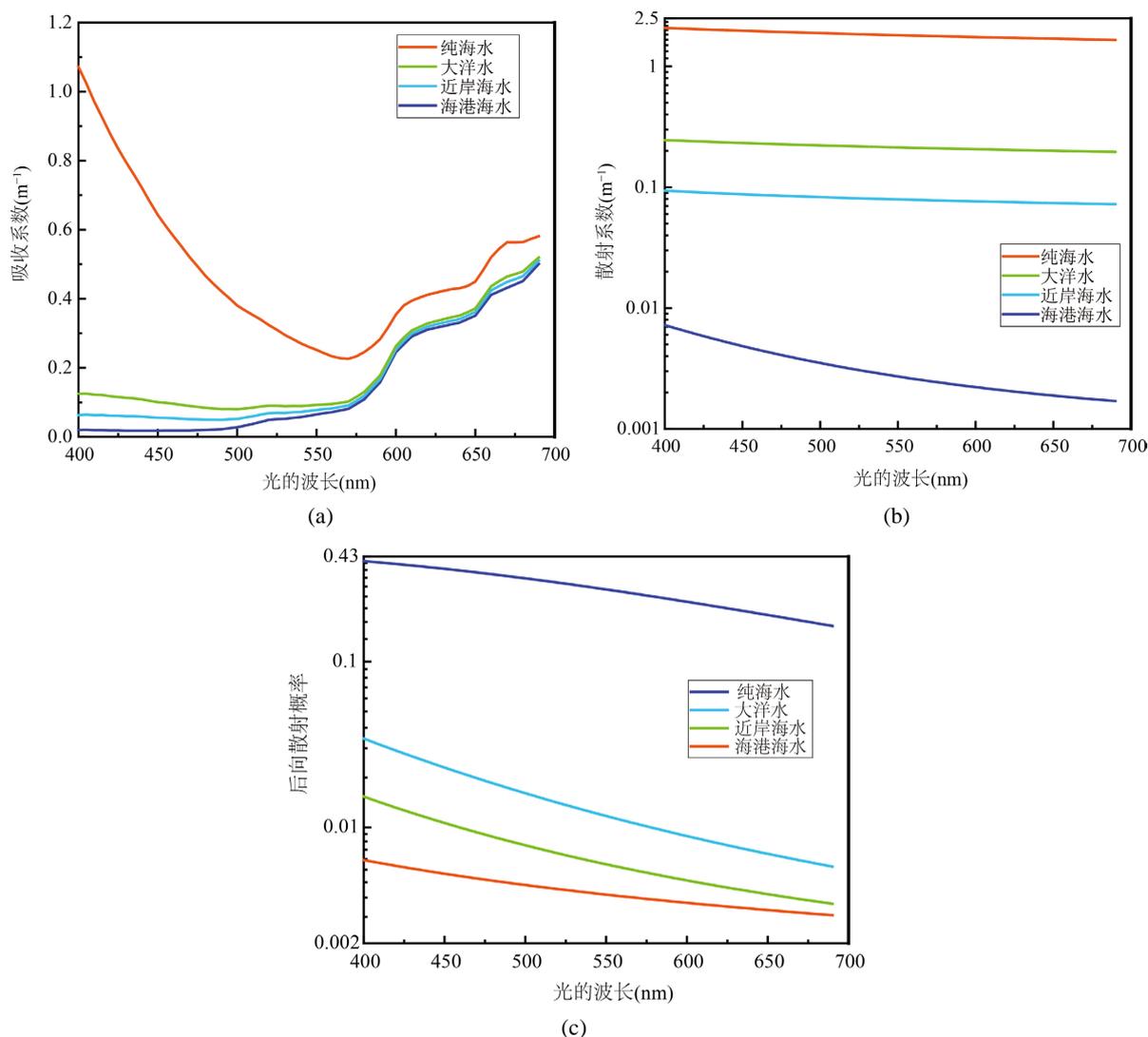


Figure 1. Relationship between optical properties and wavelength in different seawater environments. (a) Absorption coefficient; (b) Scattering coefficient; (c) Backscattering probability

图 1. 不同海水环境的光学特性与波长的关系曲线。(a) 吸收系数；(b) 散射系数；(c) 后向散射概率

吸收反映了光能量的衰减，而散射则主要反映光子与水中悬浮粒子碰撞的过程。从图 1(b)中能够看出，在低浊度水环境中，散射系数的大小随波长的增加而减小。而在高浊度水环境中，不同光的散射系数接近，但均大于较低浊度水环境，这是由于其水环境中粒子浓度较高，发生散射的概率也大幅增加。

从图 1(c)中可知，随着光波长增加，光子发生前向散射的概率增加。并且与高浊度水环境比低浊度环境具有更高的前向散射概率。

2.2. 多次散射传输模型

蒙特卡罗模拟是一种基于概率论利用随机数直接模拟光子在介质中随机运动过程的方法，该模型流程如图 2(a)所示，此方法能够清晰地模拟每个光子散射过程的运动轨迹，直到光子满足被接收条件或能量过小才停止跟踪，但收敛时间较长[17]；而指向概率法改进的多次散射模型，能够在不改变模拟结果的情况下省略对光子具体传播路径的跟踪，只对每一个光子在任何一次散射事件发生时由散射点到达接收

机并被接收的探测概率进行计算，统计光子在各个时间段内到达接收端的概率分布，使收敛时间大幅度降低[17]，该模型流程如图 2(b)所示。

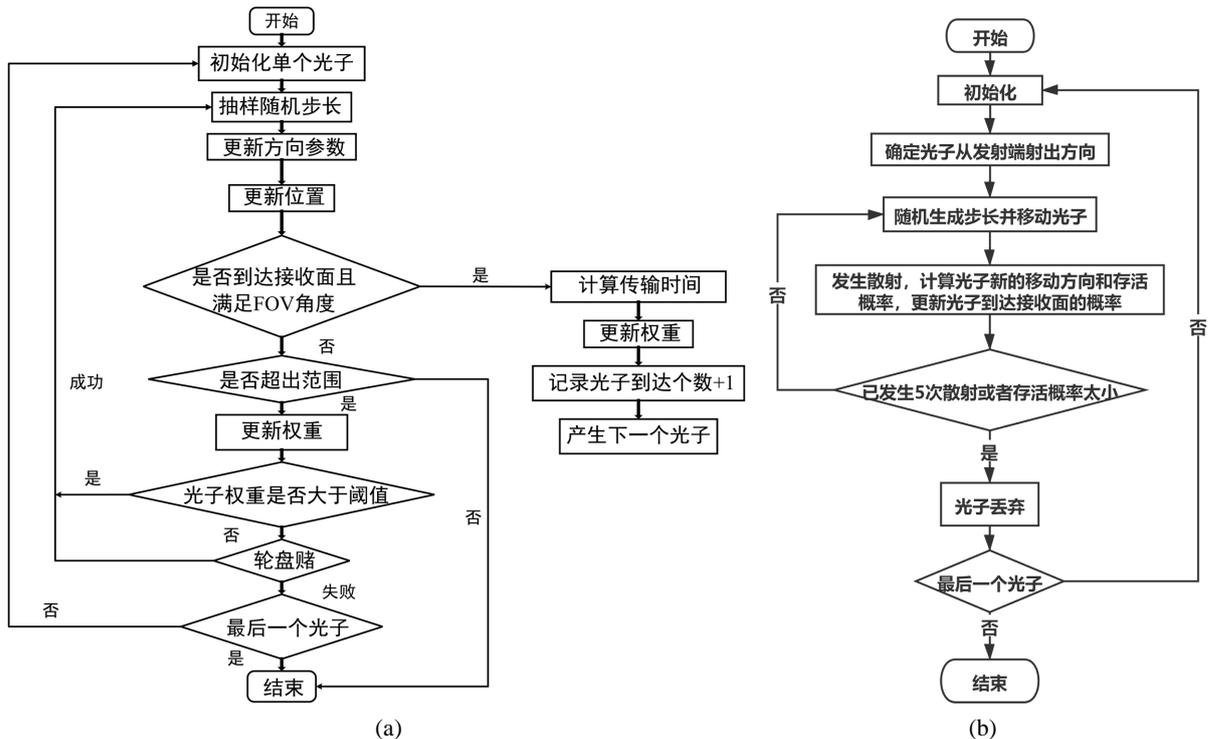


Figure 2. Comparison of multiple scattering models. (a) Monte Carlo method; (b) Multiple scattering model improved by pointing probability method

图 2. 多次散射模型对比。(a) 蒙特卡罗法；(b) 指向概率法改进的多次散射模型

指向概率法的基本思想是：发射端发射大量光子，模拟每一个光子运动的全过程，每一个光子初始出射方向在发散角内是随机分布的，光子沿着初始出射方向运动。运动随机步长后，遇到第一个散射点 R_1 ，发生散射，如果 R_1 点在接收端视场角范围内，光子就有可能被接收端接收，计算光子被接收端接收的概率。光子在 R_1 点发生散射后，光子运动方向将发生改变，光子继续运动随机步长，直到遇到第二个散射点 R_2 发生散射，如果 R_2 点在接收端的视场角范围内，计算光子二次散射后被接收端接收的概率，然后光子继续移动，多次散射的情况以此类推。当光子到达接收端的概率或存活概率太小时，光子被丢弃。用指向概率法最终可以计算出一个光子能到达接收端的平均概率，进一步可以计算出系统的路径损耗。

非视距非共面多次散射传播模型如图 3 所示，将发射端 T_y 设在 xyz 坐标系的原点位置 $(0,0,0)$ ，将接收端 R_y 设于 y 轴的正半轴上，且 T_y 与 R_y 之间的距离为 d 。 C_t 和 C_r 分别表示发射光锥和接收视场角锥体； θ_t 和 θ_r 分别表示发射端仰角和接收端仰角； ψ_t 和 ψ_r 分别表示发散半角和视场角半角； α_t 和 α_r 分别为 C_t 和 C_r 的偏转角。 R_n 为第 n 次散射的散射点。 ζ_{sn} 为 R_n 与 R_y 接收面中心点的连线与 C_r 中心轴的夹角， β_{sn} 为光子在 R_n 点入射方向与光子散射后传播方向的夹角。

如图 3 所涉及到的坐标转变是为了方便仿真光子的运动轨迹，将光子的初始状态置于 $x''y''z''$ 坐标系中，利用坐标系之间的转换，引入新坐标系 $x'y'z'$ ，从而确定光子的初始状态在 xyz 坐标系下的表达式。以激光器发射光轴在 yz 平面的投影所在直线为 z' 轴， x' 轴与 x 轴重合，则坐标系 $x'y'z'$ 可以看作由坐标

系 xyz 绕 x 轴顺时针旋转 θ_{se} 角度而得；再以激光器发射光轴所在直线为 z'' 轴， y'' 与 y' 轴重合，则坐标系 $x''y''z''$ 可以看作由坐标系 $x'y'z'$ 绕 y' 轴顺时针旋转 β_{se} 角度而得。则光子各坐标轴方向上的方向余弦可表示为：

$$\begin{bmatrix} \mu_x \\ \mu_y \\ \mu_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_{se} & \sin \theta_{se} \\ 0 & -\sin \theta_{se} & \cos \theta_{se} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta_{se} & 0 & -\sin \beta_{se} \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \beta_{se} & 0 & \cos \beta_{se} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin \theta \cos \phi' \\ \sin \theta \sin \phi' \\ \cos \theta \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

其中， θ 为在坐标系 $x''y''z''$ 中发射光子的传输方向的天顶角， ϕ' 为方位角。

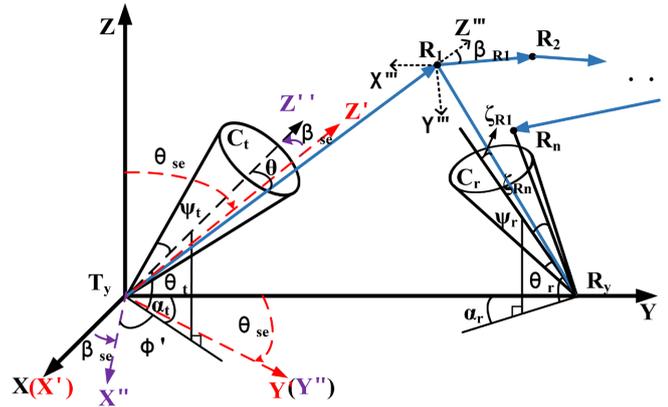


Figure 3. Non-line-of-sight non-coplanar multiple scattering propagation model
图 3. 非视距非共面多次散射传播模型

2.3. 光子接收判断

光子接收判断过程如图 4 所示。记接收机的接收孔径底面半径为 r ，穿过接收机端面的接收视场角中轴线与端面圆心点指向散射点的矢量(长度为 L_0)的夹角为 ξ 。以散射点 h_n 为球心、 L_0 为半径的球面上，以立体角 Ω_n 截得曲面 s_n 。由于 $L_0 \geq r$ ，所以可将曲面 s_n 近似为接收孔径底面的投影。而根据圆的投影知识可知曲面 s_n 可被近似为长半轴为 r 、短半轴为 b_0 的椭圆。光子从散射点 h_n 打向接收机上时，只有当传输路径与接收机视场角中轴线所成夹角小于接收视场半角时，光子才能被接收机接收。

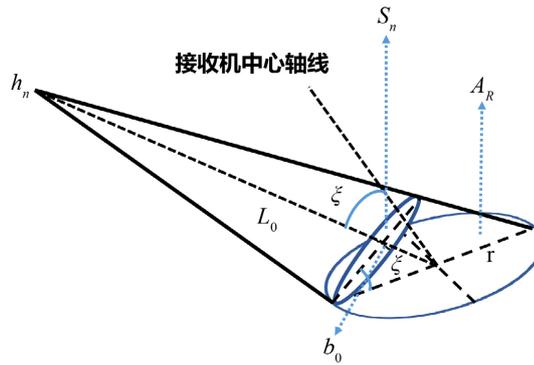


Figure 4. Geometrical schematic of the scattering point pointing to the receiver
图 4. 散射点指向接收机的几何示意图

则光子在 h_n 点发生散射后, 光子的散射方向在接收机视场角范围内并能够指向探测面的概率可表示为:

$$p_{1n} = \frac{1}{4\pi} \int_{\Omega_n} P_{TTHG}(\cos\theta_s, g) d\Omega \quad (2.6)$$

上式中 $P_{TTHG}(\cos\theta_s, g)$ 为 TTHG 体积散射函数, g 代表非对称因子, 其表示前向散射和后向散射大小。第 n 次散射后, 光子从散射点 h_n 到接收机端点 h' 所经历为传输损耗可表示为:

$$p_{2n} = \exp^{-(c|h_n-h'|)} \quad (2.7)$$

经历过第 n 次散射后, 光子能够存活概率为:

$$w_n = (1 - p_{1n}) \exp(-a \cdot \Delta L) w_{n-1} \quad (2.8)$$

由公式(2.6)~(2.8)可以得到单个光子在第 n 次散射后到达接收机的概率为:

$$P_n = w_n \cdot p_{1n} \cdot p_{2n} \quad (2.9)$$

那么, 单个光子在发生 n 次散射事件后被接收机探测到总概率为[17]:

$$P = \sum_{n=1}^{\infty} w_n \cdot p_{1n} \cdot p_{2n} \quad (2.10)$$

通过模拟大量光子, 便可得到光子在各个时间段到达的概率分布, 从而计算 NLOS UWOC 系统信道脉冲响应。

2.4. 脉冲响应

本文提到的多次散射模型就是对 N 个光子在第 n 次散射的传输过程进行模拟, 得到单个光子在不同时间段内到达接收机并被接收的概率。将各时间段光子到达接收机的概率叠加, 则传输时间内对应的概率就代表了所有散射光子形成的信道脉冲响应。

设光子经过 n 次散射后到达接收机的过程中, 散射传输总距离为 S , 可求得 S 为[18]:

$$S = r_0 + \sum_{i=2}^j r_{n-1}^i + r_n \quad (2.11)$$

式中, r_0 为发射端到散射点 R_1 的距离、 r_n 为散射点 R_n 到接收机的距离, r_{n-1}^i 为光子发生散射前后两散射点之间的距离。则可求得光子从发射机出发到被接收机接收所经历的时间为: $t_n = \frac{S}{C}$, C 为光速。将光子到达接收机的时间分为均匀大小的时间间隔, 记为 t_m , m 取整数, 时间间隔大小为 Δt , 如果

$t_m - \left(\frac{\Delta t}{2}\right) < t_n < t_m + \left(\frac{\Delta t}{2}\right)$, 则光子到达接收机的时间在第 m 个时间间隔内。

则可以计算 N 个光子经历 J 次散射后, 接收机的脉冲响应:

$$h(t_n) = \sum_{N=1}^N \sum_{J=1}^J \frac{P_{NJ}}{N\Delta t}, \quad t_m - \left(\frac{\Delta t}{2}\right) < t_n < t_m + \left(\frac{\Delta t}{2}\right) \quad (2.12)$$

其中, P_{NJ} 是 N 个光子经历 J 次散射后被接收机接收的总概率。

3. 脉冲展宽分析

海水对光信号的多次散射作用对 NLOS UWOC 传输信道的的影响主要有两方面: 一方面是散射会使光

信号到达接收机的路径不同, 直接表现为接收脉冲宽度相较于发送脉冲宽度在时域内有扩散的现象, 引起多径效应从而产生码间干扰。另一方面是光信号在海水中传输时由于受到吸收与散射作用, 使接收机接收到的能量小于发射机发出的能量, 产生路径损耗。下面将对不同信道条件下 NLOS UWOC 传输信道的脉冲响应进行分析。

在分析不同信道条件对传输信道脉冲展宽的影响时, 将模拟参数如表 2 所示。并假设发射机脉冲宽度无限窄, 以脉冲峰值的 1/3 作为接收脉冲的宽度。根据不同的模拟条件变化不同参数进行仿真。

Table 2. Simulation parameters

表 2. 仿真参数

条件类型	参数
波长(nm)	388、405、450、488、520
收发机距离(m)	0.4、0.5、0.6
发射机发散角(mrad)	0.5
接收机接受孔径大小(mm)	0.3
接收机视场角(rad)	3.14
收发机仰角(°)	10
发射机偏转角(°)	10
接收机偏转角(°)	0
光子总数	10^7
权重阈值	10^{-6}
散射次数	5

3.1. 传输波长对脉冲展宽的影响

在近岸海水环境中, 仿真不同传输波长对传输信道脉冲响应的影响, 结果如图 5 所示。

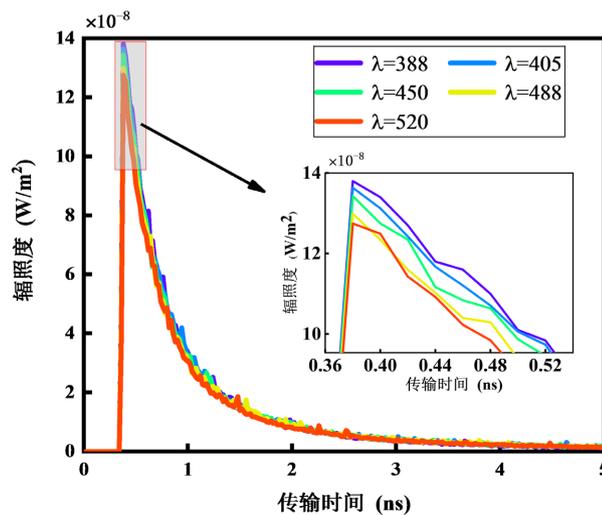


Figure 5. Influence of transmission wavelength change on impulse response

图 5. 传输波长改变对脉冲响应的影响

由图可知：388 nm、405 nm、450 nm、488 nm、520 nm 的脉冲展宽分别为：0.46 ns、0.45 ns、0.44 ns、0.43 ns、0.42 ns。说明脉冲展宽程度随波长的增大而减小。由图 5 插图，可以看出脉冲响应曲线峰值随波长的增加而将低。其原因是波长越短，散射越强，且在近岸海水中非色素悬浮粒子的浓度较高，使得光子多次散射产生的导致光传输强度增加的效果明显，而传输导致的损耗有限，使得光散射的能量远大于光衰减的能量。多次散射后的光子还能够被接收机接收到，从而使脉冲曲线峰值对应的辐照度值较大。

由此不难发现，在 NLOS UWOC 传输信道中，388 nm 紫外光因其散射能力强更适应于短距离 NLOS UWOC。

3.2. 海水环境对脉冲展宽的影响

传输波长为 405 nm 时仿真不同海水环境对传输信道脉冲响应的影响，结果如图 6 所示。

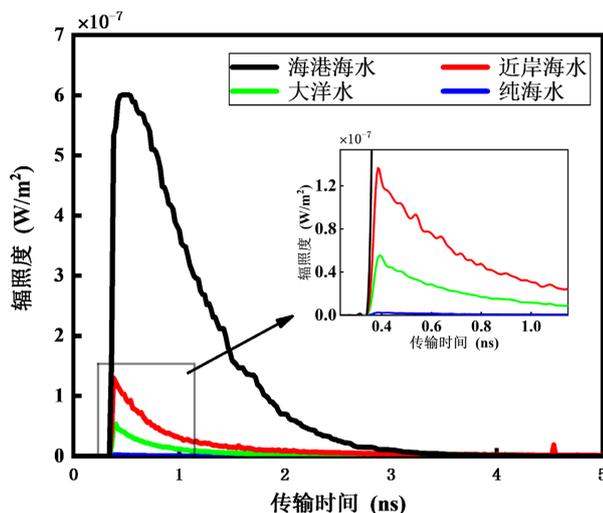


Figure 6. Influence of seawater environment change on impulse response

图 6. 海水环境改变对脉冲响应的影响

由图可知，传输波长为 405 nm 时，纯海水、大洋水、近岸海水、海港海水分别对应的脉冲展宽效应分别为 0.38 ns、0.42 ns、0.99 ns、1.05 ns；脉冲展宽程度随水浊度的增加而增加，而海港海水由于非色素悬浮粒子浓度较高，光子发生散射次数增多，光子传播路径增长，导致其脉冲展宽程度最大。

脉冲响应曲线峰值随水浊度的增加而增大。这是因为在水浊度较高的海水中，由于海水中非色素悬浮粒子浓度较高，光子更容易发生散射，且多次散射产生的导致光传输强度增加的效果要大于传输导致的损耗，光散射的能量远大于光衰减的能量，因此导致接收机接收到的能量更大，脉冲响应峰值也相应增大。

3.3. 传输距离对脉冲展宽的影响

传输波长为 405 nm 时仿真不同通信距离对传输信道脉冲响应的影响，结果如图 7 所示。由图可知，通信距离为 0.4 m、0.5 m、0.6 m 时，分别对应的脉冲展宽效应为 0.628 ns、0.751 ns、0.864 ns；脉冲展宽效应程度随通信距离的增加而增加，脉冲响应峰值随传输距离的增加而减小。这是因为随着收发机间距的增加，散射光子的传输路程增加，导致大量散射光子达接收端的时间相对滞后，脉冲响应时延展程度增加，并且时域上呈现脉冲波形整体向右偏移。

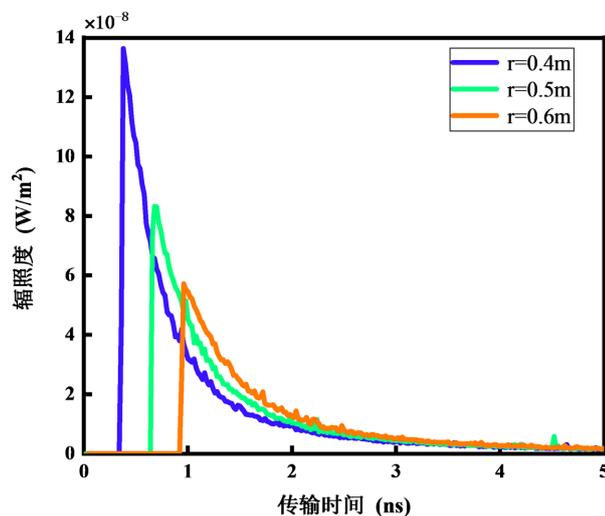


Figure 7. Influence of communication distance change on impulse response

图 7. 通信距离改变对脉冲响应的影响

4. 结论

本文利用指向概率法改进的多次散射模型研究非视距水下无线光通信系统传输信道脉冲响应特性，分析不同通信距离、不同海水环境、不同传输波长对脉冲展宽的影响。脉冲展宽效应随较长的波长、较清澈的水浊度、较短的通信距离而减小；脉冲响应峰值随较短的波长、较高的水浊度、较短的通信距离而增大。本文的研究结果可以为今后建立水下非视距无线光通信系统的设计和实现提供理论依据。

参考文献

- [1] Zia, M.Y.I., Otero, P., Siddiqui, A. and Poncela, J. (2021) Design of a Web Based Underwater Acoustic Communication Testbed and Simulation Platform. *Wireless Personal Communications*, **116**, 1171-1193. <https://doi.org/10.1007/s11277-020-07203-7>
- [2] Zaneveld, J.R.V. (1995) *Light and Water: Radiative Transfer in Natural Waters*. Academic Press, San Diego.
- [3] Singh, M., Singh, M.L., Singh, G., Kaur, H., Priyanka and Kaur, S. (2021) Real-Time Image Transmission through Underwater Wireless Optical Communication Link for Internet of Underwater Things. *International Journal of Communication Systems*, **34**, Article No. e4951. <https://doi.org/10.1002/dac.4951>
- [4] Lin, R., Liu, X., Zhou, G., Qian, Z., Cui, X. and Tian, P. (2021) InGaN Micro-LED Array Enabled Advanced Underwater Wireless Optical Communication and Underwater Charging. *Advanced Optical Materials*, **9**, Article ID: 2002211. <https://doi.org/10.1002/adom.202002211>
- [5] He, G., Lv, Z., Qiu, C. and Liu, Z. (2021) P-4.11: The Effects of Oceanic Turbulence in the 520 nm Laser Diode Underwater Wireless Optical Communication System. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, **52**, 514-515. <https://doi.org/10.1002/sdtp.14539>
- [6] Adnan, S.A., Ahmed, H., Alchalaby, A. and Kadhim, A.C. (2021) Experimental Study of Underwater Wireless Optical Communication from Clean Water to Turbid Harbor under Various Conditions. *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics*, **16**, 219-226. <https://doi.org/10.18280/ijdne.160212>
- [7] Vali, Z., Gholami, A., Ghassemlooy, Z., Michelson, D.G., Omoomi, M. and Noori, H. (2017) Modeling Turbulence in Underwater Wireless Optical Communications Based on Monte Carlo Simulation. *Journal of the Optical Society of America A*, **34**, 1187-1193. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.34.001187>
- [8] Sait, M., Sun, X., Alkhazragi, O., Alfaraj, N., Kong, M., Ng, T.K., et al. (2019) The Effect of Turbulence on NLOS Underwater Wireless Optical Communication Channels [Invited]. *Chinese Optics Letters*, **17**, Article ID: 100013. <https://doi.org/10.3788/COL201917.100013>
- [9] Tang, S., Dong, Y. and Zhang, X. (2013) On Path Loss of NLOS Underwater Wireless Optical Communication Links.

-
- 2013 *MTS/IEEE OCEANS-Bergen*, Bergen, 10-14 June 2013, 1-3.
<https://doi.org/10.1109/OCEANS-Bergen.2013.6608002>
- [10] Choudhary, A., Jagadeesh, V.K. and Muthuchidambaranathan, P. (2014) Pathloss Analysis of NLOS Underwater Wireless Optical Communication Channel. 2014 *International Conference on Electronics and Communication Systems (ICECS)*. Coimbatore, 13-14 February 2014, 1-4. <https://doi.org/10.1109/ECS.2014.6892620>
- [11] Arnon, S. and Kedar, D. (2009) Non-Line-of-Sight Underwater Optical Wireless Communication Network. *Journal of the Optical Society of America A*, **26**, 530-539. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.26.000530>
- [12] He, G., Lv, Z., Qiu, C. and Liu, Z. (2021) 21.3: The Influence of NLOS on Underwater Wireless Optical Communication System Using an InGaN-Based Micro-LED and NRZ-OOK Modulation. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, **52**, 286-288. <https://doi.org/10.1002/sdtp.15095>
- [13] Jagadeesh, V.K., Naveen, K.V., Muthuchidambaranathan, P. (2015) BER Performance of NLOS Underwater Wireless Optical Communication with Multiple Scattering. *International Journal of Electronics and Communication Engineering*, **9**, 563-566.
- [14] Sun, X., Cai, W., Alkhazragi, O., Ooi, E.-N., He, H., Chaaban, A., *et al.* (2018) 375-nm Ultraviolet-Laser Based Non-Line-of-Sight Underwater Optical Communication. *Optics Express*, **26**, 12870-12877. <https://doi.org/10.1364/OE.26.012870>
- [15] Sun, X., Kong, M., Alkhazragi, O., Ooi, E.-N., Zhang, X., Buttner, U., *et al.* (2020) Non-Line-of-Sight Methodology for High-Speed Wireless Optical Communication in Highly Turbid Water. *Optics Communications*, **461**, Article ID: 125264. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2020.125264>
- [16] Haltrin, V.I. (1999) Chlorophyll-Based Model of Seawater Optical Properties. *Applied Optics*, **38**, 6826-6832. <https://doi.org/10.1364/AO.38.006826>
- [17] 肖后飞. 紫外光通信系统传输模型研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京邮电大学, 2014.
- [18] 宋鹏. 无线紫外光移动自组网信道传输特性研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安理工大学, 2017.