

doi:10.13756/j.gtxyj.2025.250003.

专题:海洋通信与传感网络

韩彪,刘彬,张宇,等. 后向散射角度对水下全双工无线光通信的影响[J]. 光通信研究, 2025(4): 250003.

Han B, Liu B, Zhang Y, et al. The Influence of Backscattering Angle on Full-duplex Underwater Wireless Optical Communication [J]. Study on Optical Communications, 2025(4): 250003.

后向散射角度对水下全双工无线光通信的影响(特邀)

韩彪¹, 刘彬², 张宇³, 马琳¹, 刘禹彤⁴, 康永强¹

(1. 西安电子科技大学光电工程学院, 西安 710071; 2. 中海辉固地学服务(深圳)有限公司, 广东 深圳 518000;
3. 国家海洋技术中心, 天津 300112; 4. 三亚学院新能源与智能网联汽车学院, 海南 三亚 572022)

摘要:【目的】光在水中传输时的后向散射是影响双向水下无线光通信(UWOC)传输稳定性的主要因素之一,在全双工UWOC系统中,可以利用接收机内部的滤光片抑制这种噪声。然而,滤光片的透射波长随着光束入射角度会发生“蓝移”现象,因此后向散射噪声的角度分布特征会对这种通信体制的噪声抑制能力产生影响。【方法】针对这一问题,文章利用蒙特卡洛方法构建了仿真模型,定性研究了后向散射噪声的角度分布特征,并结合光学滤光片的角度特性分析了其对通信系统性能的影响。【结果】结果表明,对于大角度发射和接收的全双工UWOC系统,后向散射噪声的角度分布比较分散,这对UWOC系统中发射波长小于接收波长的通信设备影响较大。工程应用中,在不影响UWOC系统链路建立效率、设备结构复杂度和有效通信距离等指标的前提下,可以通过适当减小通信发射角、接收孔径和视场,增大通信设备中发射机和接收机的间距以及双向光信号的波长间隔等方法抑制这种影响。利用这种设计思路,文章采用450和520 nm的蓝绿光搭建了发射角和接收视场约为50°的全双工UWOC系统,在2.2~13.2 m的距离内,两个链路分别实现了89.6和84.8 Mbit/s的文件传输速率。【结论】文章研究结果对于设计大角度发射和接收的全双工UWOC系统具有参考意义。

关键词:水下无线光通信;后向散射;滤光片

中图分类号: TN929 **文献标志码:** A

The Influence of Backscattering Angle on Full-duplex Underwater Wireless Optical Communication

HAN Biao¹, LIU Bin², ZHANG Yu³, MA Lin¹, LIU Yutong⁴, KANG Yongqiang¹

(1. School of Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China; 2. China Offshore Fugro Geosolutions (Shenzhen) Co., Ltd., Shenzhen 518000, China; 3. The National Ocean Technology Center, Tianjin 300112, China; 4. School of New Energy and Intelligent Networked Automobile, University of Sanya, Sanya 572022, China)

Abstract: 【Objective】In bidirectional Underwater Wireless Optical Communication (UWOC) system, backscattering is one of the major factors which affect its stability. In a full-duplex UWOC system, such noise could be removed by optical filter in the receiver. However, because the transmission wavelength of filter would be “blue shift” with incident angle of light, the backscattering angle will affect the noise suppression performance. 【Methods】In this paper, a theoretical model is constructed by Monte Carlo method to qualitatively study the angle distribution characteristics of backscattering noise and its influence on UWOC performance. 【Results】The results show that, angle distribution of backscattering noise is relatively dispersed in full-duplex UWOC system with large divergence angle and filed. It has a great influence on the equipment whose transmitting wavelength is smaller than the receiving one. In engineering applications, without affecting the link establishment efficiency, equipment structural complexity, and effective communication distance of the UWOC system, the impact can be mitigated by appropriately reducing the communication transmission angle, receiver aperture, and field of view, increasing the spacing between the transmitter and receiver in the communication equipment, and enlarging the wavelength interval of the bidirectional optical signals. Using this method, a full-duplex UWOC system is built with about 50° transmitting angle and field based on 450 and 520 nm blue-green light. In the communication distance of 2.2~13.2 m, the file transmitting rates are 89.6 and 84.8 Mbit/s for the two transmission links respectively. 【Conclusion】The research results in this paper are helpful to design a full-duplex UWOC system with large transmitting and receiving angles.

Key words: UWOC; backscattering; optical filter

收稿日期:2025-01-03; 修回日期:2025-04-03; 纸质出版日期:2025-08-10

基金项目:国家重点研发计划课题资助项目(2022YFC2808101);国家自然科学基金资助项目(62475207);陕西省自然科学基金资助项目(2023-JC-QN-0753);自然资源部海洋观测技术重点实验室开放基金资助项目(2022klootA01)

作者简介:韩彪(1987-),男,陕西咸阳人。副教授,博士,主要研究方向为水下光通信和光学测量。

刘彬(1986-),男,山东莱芜人。工程师,硕士,主要研究方向为海洋工程技术。

张宇(1983-),男,吉林白城人。工程师,硕士,主要研究方向为新型海洋通信。

马琳(1970-),女,陕西西安人。副教授,博士,主要研究方向为光电子技术及应用。

作者贡献声明:韩彪、刘彬、张宇和马琳贡献等同,为共同第一作者。

通信作者:韩彪,副教授。E-mail:hanbiao@xidian.edu.cn

© Editorial Office of Study on Optical Communications. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

0 引言

水下无线光通信(Underwater Wireless Optical Communication, UWOC)由于具有传输速率高的优势,在海洋领域引起了广泛关注^[1-5]。近年来,美国伍兹霍尔海洋研究所^[6-7]、日本国立海洋研究开发机构^[8]、中科院声学所和北京邮电大学^[9]等研究团体相继在深海验证了这种技术在工程应用中的可行性。在这些试验中,为了便于在水下快速建立光通信传输链路,通信设备一般具有较大的发射角度和接收视场,使得通信发射机和接收机易于对准^[6-7, 10-11]。在此基础上,工程中需要解决的核心难题是抑制水体后向散射对双向通信稳定性的影响^[12]。针对该问题,除了采用半双工通信模式^[6-7, 10-11]和正交波形编码^[13]等方案外,另一种普遍做法是双向光信号采用两种波长,通过在接收机中加入相应的滤光片去除光噪声^[8-9]。这种方法可以全双工工作,带宽利用率相对较高,环境适应性强。然而,由于滤光片透射波长与光波入射角度有关^[14],在这种大角度发射和接收的全双工通信系统中应用时,后向散射噪声的抑制效果会随着进入接收机的角度而变化。目前,针对后向散射噪声的能量强度和空间分布已有大量研究^[12, 15],但对这种噪声的角度分布及其对通信系统的影响鲜有公开报道。为此,本文首先仿真模拟后向散射噪声的角度分布特征,然后结合光学滤光片的角度特性分析了其对通信的影响并探索了解决方法,为全双工UWOC技术的应用提供了理论帮助。

1 仿真模型

光在水下散射介质中的传输过程可以用蒙特卡罗方法进行仿真^[12, 15-16]。这种方法通过跟踪和统计大量光子在水中的运动轨迹得到光波传输后的特征。本文基于该方法,参照文献^[12]构建仿真模型分析后向散射噪声的角度分布特征。如图1所示,xyz为以“发射机1#”中心为原点建立的三维立体坐标系,双向UWOC系统由“通信设备1#”(包括“发射机1#”和“接收机1#”)和“通信设备2#”(包括“发射机2#”和“接收机2#”)组成,分别位于“z=0”和“z=S”平面,S为两个通信设备所在平面的距离。在两个通信设备中,发射机和接收机间距为L;发射机的发射角为 θ_T ,发光面是直径为D的圆形;接收机的接收面也是圆形,孔径为d。从“发射机1#”和“发射机2#”出射的光分别进入“接收机1#”和

“接收机2#”时,对应的就是后向散射噪声。假设两个通信设备的光学参数相同,通过分析“接收机1#”检测到的来自“发射机1#”的光子入射角,可以得到后向散射噪声的角度分布。

如图1所示,当光子从发光面出射时,其位置可以用极坐标 (ρ, α) 表示;其发射方向可以用方位角 φ_0 和俯仰角 θ_0 表示,对应的方向余弦为 $(\mu_{x0}, \mu_{y0}, \mu_{z0})$ 。假设光子出射时在发光面的位置沿径向和角向都均匀分布,那么初始坐标 (x_0, y_0, z_0) 可表示为

$$\begin{cases} x_0 = 0.5 \times D \times \text{rand}_r \times \cos(2\pi \times \text{rand}_j) \\ y_0 = 0.5 \times D \times \text{rand}_r \times \sin(2\pi \times \text{rand}_j) \\ z_0 = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中, rand_r 和 rand_j 均为随机数。这里的随机数是指均匀分布在 $[0, 1]$ 区间的数字,可由计算机随机生成。

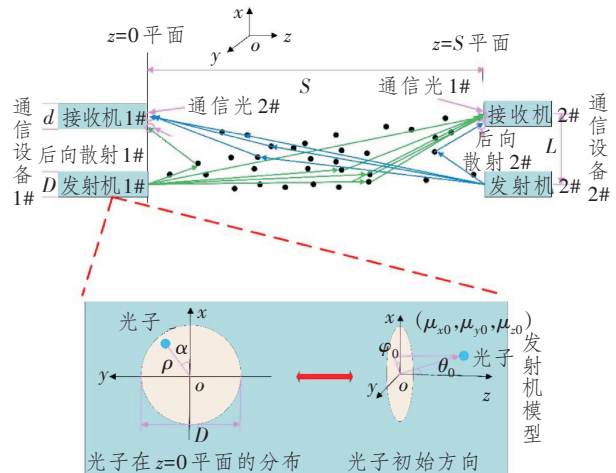


图1 双向UWOC后向散射示意图

Figure 1 Schematic diagram of backscattering underwater in bidirectional UWOC system

假设光子出射时的初始方向也是均匀分布的,那么初始方向余弦 $(\mu_{x0}, \mu_{y0}, \mu_{z0})$ 可表示为

$$\begin{cases} \mu_{x0} = \sin(2\pi \times \text{rand}_\varphi) \times \sin(0.5 \times \theta_T \times \text{rand}_\theta) \\ \mu_{y0} = \cos(2\pi \times \text{rand}_\varphi) \times \sin(0.5 \times \theta_T \times \text{rand}_\theta) \\ \mu_{z0} = \cos(0.5 \times \theta_T \times \text{rand}_\theta) \end{cases} \quad (2)$$

式中, rand_φ 和 rand_θ 均为随机数。

光子离开“发射机1#”后,在水中沿着直线传播一段自由程s,s可表示为

$$s = \frac{-1}{a+b} \ln(\text{rand}_s), \quad (3)$$

式中,a、b和 rand_s 分别为吸收系数、散射系数和随机数。

新坐标 (x, y, z) 可表示为

$$\begin{cases} x = x_0 + \mu_{x0}S \\ y = y_0 + \mu_{y0}S \\ z = z_0 + \mu_{z0}S \end{cases} \quad (4)$$

若式(4)中 z 的大小在 $[0, S]$ 之间,光子要么被吸收,要么发生散射,可以通过“俄罗斯轮盘赌”的方式判断究竟发生哪种过程。具体方法是:由计算机生成一个随机数,若大于阈值 W_H ,光子因为吸收而湮灭,终止追踪;否则,光子因为散射而传输方向发生改变,阈值 W_H 和新的方向余弦 (μ_x, μ_y, μ_z) 可表示为

$$W_H = \frac{b}{a+b}, \quad (5)$$

$$\begin{cases} \mu_x = \frac{\sin\theta}{\sqrt{1-\mu_{z0}^2}} (\mu_{x0}\mu_{z0}\cos\varphi - \mu_{y0}\sin\varphi) + \mu_{x0}\cos\theta \\ \mu_y = \frac{\sin\theta}{\sqrt{1-\mu_{z0}^2}} (\mu_{y0}\mu_{z0}\cos\varphi + \mu_{x0}\sin\varphi) + \mu_{y0}\cos\theta, \quad |\mu_{z0}| < 1 \\ \mu_z = -\sin\theta\cos\varphi\sqrt{1-\mu_{z0}^2} + \mu_{z0}\cos\theta \\ \left. \begin{cases} \mu_x = \sin\theta\cos\varphi \\ \mu_y = \sin\theta\sin\varphi, \\ \mu_z = \mu_{z0}\cos\theta \end{cases} \right| |\mu_{z0}| = 1 \end{cases} \quad (6)$$

式中: φ 为新的方位角,均匀分布在 $[0, 2\pi]$ 区间; θ 为新的俯仰角。 θ 可以用 Henyey-Greenstein 模型得到^[17],可表示为

$$\cos\theta = \frac{1}{2g} \left[1 + g^2 - \left(\frac{1-g^2}{1-g+2g \times \text{rand}_{01}} \right)^2 \right], \quad (7)$$

式中: rand_{01} 为随机数; g 为非对称因子。本文选取 $g=0.924$,在大多数情况下,该参数的近似效果较好^[12]。

光子散射后,如式(3)和式(4)所示继续传播一段自由程。

当光子坐标满足 $0 \leq z \leq S$ 时,循环上述过程,通过式(3)~式(7)仿真光子在水中的轨迹;当 $z > S$ 时终止追踪;当 $z < 0$ 时修正光子的坐标,使其位于 $z=0$ 平面。设置“接收机 1#”的中心坐标为 $(0, L, 0)$,对于坐标在接收机内的后向光子,利用其方向余弦计算进入接收机的入射角度;然后,按照 1° 的间隔把 $[0, 90^\circ]$ 分割成 90 个角度区间,统计每个区间内的后向光子个数;最后,利用每个区间内的光子数与总的仿真光子数之比 n_k ($k=1, 2, \dots, 90$) 表征不同角度时的后向散射强度,用来分析其角度分布特征。

2 后向散射噪声角度分布的仿真分析

设置“发射机 1#”的直径为 0.1 m 、仿真的光子总数为 10^9 ,利用上述模型分析后向散射噪声的角度分布特征。首先,设置 $\theta_T=60^\circ, S=50 \text{ m}, b=0.08 \text{ m}^{-1}, L=0.2 \text{ m}, d=0.2 \text{ m}$,吸收系数 $a=0.04, 0.08, 0.12$ 和 0.16 m^{-1} 。图 2 所示为 a 不同时后向散射角度分布图,由图可见, a 不同时后向散射角度分布都比较分散,随着 a 的增大,不同角度时的后向散射强度 n_k 略有减少,但变化不明显。

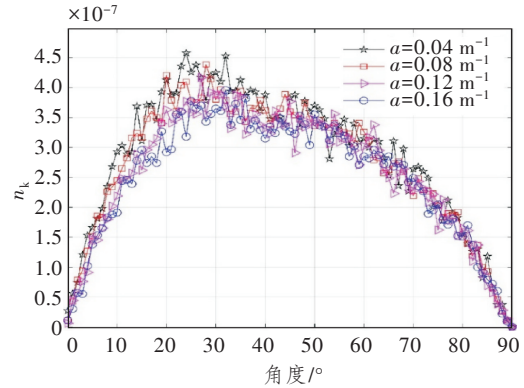


图 2 吸收系数 a 不同时后向散射角度分布
Figure 2 The angle distribution of backscattering with different absorption coefficients a

设置 $a=0.08 \text{ m}^{-1}, \theta_T=60^\circ, S=50 \text{ m}, L=0.2 \text{ m}, d=0.2 \text{ m}$,散射系数 $b=0.04, 0.08, 0.12$ 和 0.16 m^{-1} 。图 3 所示为 b 不同时后向散射角度分布图,由图可知, b 不同时后向散射噪声角度分布都比较分散,随着 b 的增大,不同角度时的后向散射强度 n_k 都明显增加。

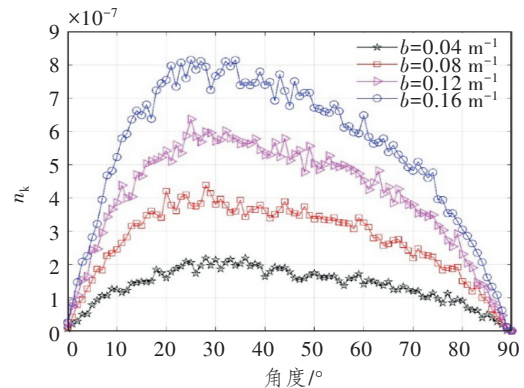


图 3 散射系数 b 不同时后向散射角度分布
Figure 3 The angle distribution of backscattering with different scattering coefficients b

设置 $a=0.08 \text{ m}^{-1}, b=0.08 \text{ m}^{-1}, S=50 \text{ m}, L=0.2 \text{ m}, d=0.2 \text{ m}$,发射角 $\theta_T=30, 60, 90$ 和 120° 。图 4 所示为 θ_T 不同时后向散射角度分布图,由图可知, θ_T

不同时的后向散射角度分布都比较分散,随着 θ_T 的增大,小角度的后向散射强度 n_k 减少,大角度的后向散射强度 n_k 增大。

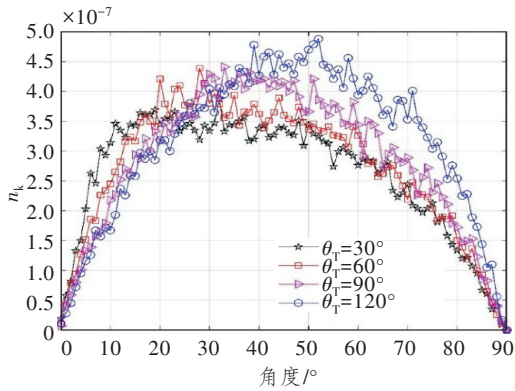


图4 发射角 θ_T 不同时的后向散射角度分布
Figure 4 The angle distribution of backscattering with different divergence angles θ_T

设置 $a=0.08\text{ m}^{-1}$, $b=0.08\text{ m}^{-1}$, $\theta_T=60^\circ$, $L=0.2\text{ m}$, $d=0.2\text{ m}$, 传输距离 $S=30、40、50$ 和 60 m 。图5所示为 S 不同时的后向散射角度分布图,由图可知, S 不同时的后向散射噪声角度分布都比较分散,随着 S 的增加,不同角度时的后向散射强度 n_k 几乎没有变化。

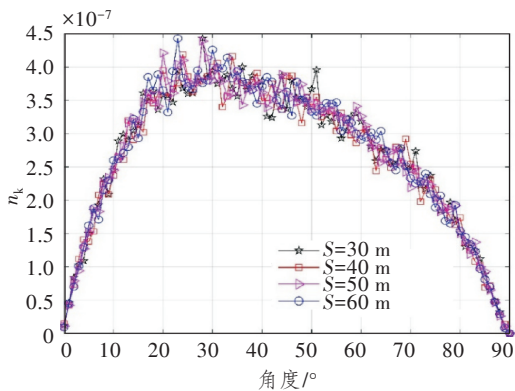


图5 传输距离 S 不同时的后向散射角度分布
Figure 5 The angle distribution of backscattering with different transmitting distances

设置 $a=0.08\text{ m}^{-1}$, $b=0.08\text{ m}^{-1}$, $\theta_T=60^\circ$, $S=30\text{ m}$, $L=0.2\text{ m}$, 接收孔径 $d=0.1、0.2$ 和 0.3 m 。图6所示为 d 不同时的后向散射角度分布图,由图可知, d 不同时的后向散射角度分布比较分散,随着 d 的增大,不同角度时的散射强度 n_k 都明显增加。

设置 $a=0.08\text{ m}^{-1}$, $b=0.08\text{ m}^{-1}$, $\theta_T=60^\circ$, $S=30\text{ m}$, $d=0.1\text{ m}$, 收发机间距 $L=0.1、0.2$ 和 0.3 m 。图7所示为 L 不同时的后向散射角度分布图,由图可知, L 不同时的后向散射角度分布都比较分散,当 L

增大时,不同角度时的散射强度 n_k 都明显下降,小角度散射噪声下降较多,大角度下降较少。

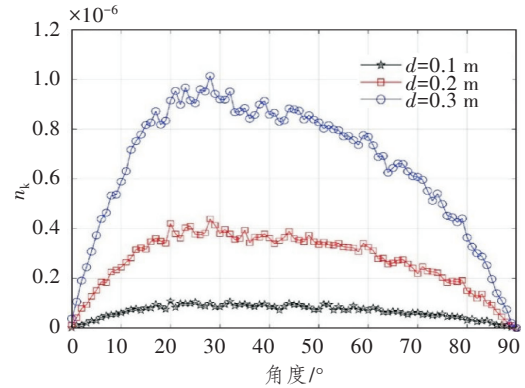


图6 接收孔径 d 不同时的后向散射角度分布
Figure 6 The angle distribution of backscattering with different receiving apertures d

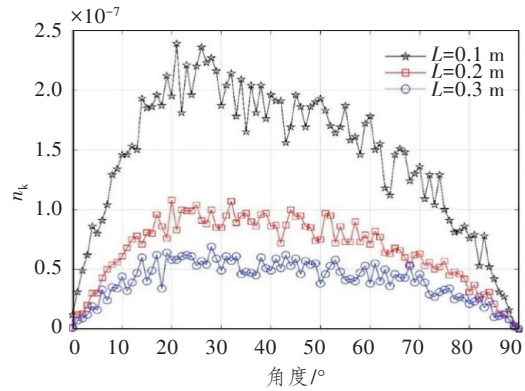


图7 收发机间距 L 不同时的后向散射角度分布
Figure 7 The angle distribution of backscattering when the transmitter and receiver with different distances in an equipment L

综合上述仿真结果,能够定性得到后向散射噪声的角度分布规律。可以看到:不同角度时的后向散射噪声强度与散射系数、通信发射角、接收孔径以及发射机和接收机间距关系紧密,几乎不随传输距离变化,受吸收系数的影响也较小。随着散射系数和接收孔径的增大,不同角度时的散射强度都明显增加;随着发射角的增大,小角度的后向散射减小,大角度的后向散射增多;随着发射机与接收机间距的增加,不同角度时的散射强度都明显减小,大角度分量的减少速度相对而言较为缓慢。这是因为进入“接收机 1#”的后向光子主要来源于“发射机 1#”附近的水域。当通信传输距离增加时,“发射机 1#”附近的后向光子几乎不受影响,因此后向散射强度和角度分布变化不明显。当水体吸收系数增大时,增加了光传输过程中的能量损耗,因此到达接收机的

后向散射噪声强度减小,但角度分布变化不明显。当水体散射系数增大时,水中发生散射的几率增大,由于光子发生后向散射时的角度随机性较强,因此不同角度的后向散射强度都会增加。当接收机孔径增大时,不同角度的后向散射光子能够进入接收机的几率都会变大。当通信发射角增加时,由于出射光的角度本身就较大,因此后向散射噪声中的大角度光子占比增加。当通信设备中发射机与接收机的间距增大时,能够进入接收机的后向散射噪声减小,从几何关系考虑,小角度光子减小的更多。

3 后向散射噪声角度分布对全双工 UWOC 系统的影响分析

上述定性分析结果表明,在大角度发射和接收的全双工 UWOC 系统中,后向散射噪声的角度分布比较分散,这会对通信系统中滤光片的噪声抑制效果产生影响。工程中常用的滤光片是基于光学镀膜的多光束干涉原理工作的^[18-19]。随着入射光角度的增大,这种器件的透射波长会减小,即发生“蓝移”现象^[14]。为了说明这种现象,选择商业化滤光片^[20]对不同入射角时的透射光谱进行测量。鉴于 UWOC 通常用蓝绿波段发光二极管(Light Emitting Diode, LED)和激光二极管(Laser Diode, LD)作为通信光源,选择测试的滤光片中心波长为 520 nm、带宽为 30 nm、截止深度为 4。图 8 所示为商业化滤光片透射特性的实测图,由图可知,当光波入射角从 0 变化到 45°时,滤光片的透射波长逐渐减小;当入射角角度为 45°时,滤光片的中心透射波长约为 475 nm。

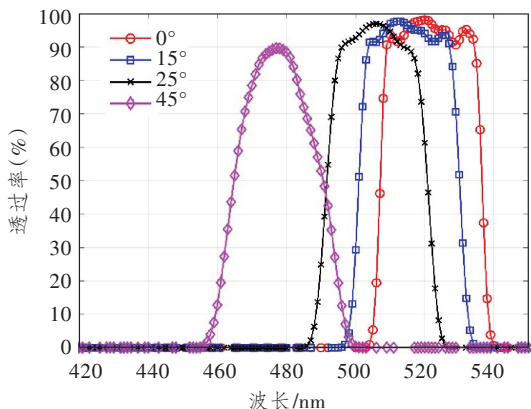


图 8 商业化滤光片透射特性实测图

Figure 8 Measurement of transmission characteristics of commercial filter

滤光片的这种特点会对全双工 UWOC 两个通

信设备的噪声抑制效果产生不同的影响。在工程应用中,UWOC 系统所标称的工作波长一般指的是光信号正入射时的波长范围。UWOC 两个设备的发射波长和接收波长是彼此对应的。当通信设备发射波长大于接收波长时,随着后向散射噪声入射角的增大,滤光片能够透射的工作波长范围变得更小,因此接收机依然可以滤除后向散射噪声;当通信设备发射波长小于接收波长时,如果在某个入射角范围内,滤光片的透射波长范围刚好涵盖发射波长,后向散射噪声是可以进入接收机的。因此,后向散射噪声的角度分布主要影响发射波长小于接收波长的通信设备。

针对这种影响,结合图 2~图 7 的仿真结果可知,减小通信发射角、接收孔径和视场以及增大发射机与接收机的间距,能够从整体上降低进入接收机的大角度后向散射噪声,减小这种噪声穿透滤光片的几率。但是这会链路对准和 UWOC 结构设计带来挑战。另一方面,由图 8 所示的滤光片角度特性测量结果可知,增加双向光信号的波长间隔,能够增大后向散射噪声与滤光片透射波长匹配时的入射角度,降低噪声进入接收机的几率。但是这会增加两路光信号在水中传输时的衰减差异,影响双向通信的有效传输距离。

因此,在全双工 UWOC 系统中,需要从系统整体性能考虑后向散射噪声的抑制方法。总的来说,在不影响全双工 UWOC 链路建立效率、通信设备结构复杂度和双向通信有效距离等指标的前提下,适当地减小通信发射角、接收孔径和视场、增大发射机与接收机的间距以及双向光信号的波长间隔,能够提升后向散射噪声的抑制效果。

4 全双工 UWOC 系统实验

基于上述全双工 UWOC 系统设计思路,结合图 8 所示的滤光片测试结果,选择波长为 450 nm 的蓝光和 520 nm 的绿光作为通信设备的波长。通信设备的发射和接收模块密封在同一个水密壳体内,发射和接收窗口的直径都是 4.4 cm,中心间距为 4.8 cm。发射模块采用平均发射功率约 500 mW 的 LD,经过光学整形后的发射角约为 50°。接收模块中的滤光片的中心波长与光源波长对应,带宽均为 30 nm,截止深度均为 4;接收模块中的光电探测器采用不带光学系统的光电倍增管;接收模块的有效视场约为 50°。通信设备对外数据接口采用传输

控制协议(Transmission Control Protocol/Internet Protocol, TCP/IP)。通信链路的传输速率按照125 Mbit/s的百兆以太网设计。

为了验证全双工 UWOC 系统的传输效果,如图9所示,在长30 m、宽3 m、深3 m的人工水池中开展验证试验。通信设备通过法兰分别安装在实验水池的支架上。实验过程中,水池中注满过滤后的清澈自来水,通信系统布放深度约为1.2 m。通过移动水池中的支架改变通信距离,通过调节通信接收模块中探测器的增益电压,使得不同距离下探测器的输出电压基本不变。分别用两台电脑通过水密线缆与通信设备连接,并且利用“飞秋”软件^[21]在两台电脑之间传输1 GB的压缩文件。这是一款应用于局域网的即时通讯软件,可以在两台电脑之间传送文件,并且可以显示文件传输的实时速率和平均速率。当采用链路速率为125 Mbit/s的百兆网线直接将两台电脑相连时,“飞秋”软件传输文件的平均速率约为11.3 MB/s,即90.4 Mbit/s。

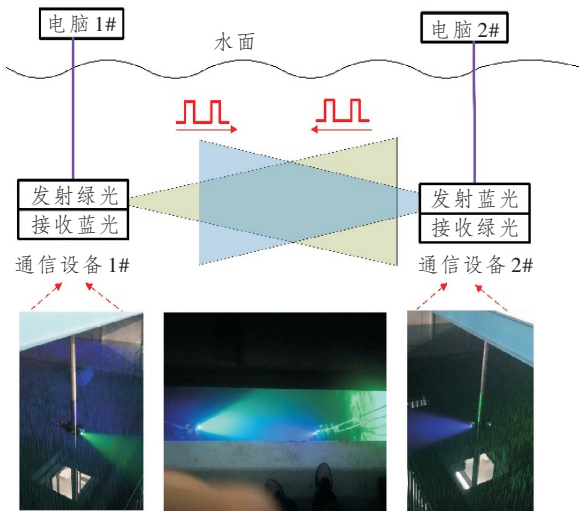


图9 水池 UWOC 系统示意图

Figure 9 Schematic diagram of UWOC system in artificial pool

利用上述系统在2.2~13.2 m的通信范围内先从“电脑1#”向“电脑2#”传送文件,再从“电脑2#”向“电脑1#”传送文件,测试结果如表1所示。由表可知,1 GB文件沿着450 nm蓝光链路传输时平均速率约为89.6 Mbit/s,沿着520 nm绿光链路传输时平均速率为84.8 Mbit/s。UWOC系统中蓝光和绿光链路的平均速率接近 UWOC 系统的最优速率,相对而言,蓝光链路优于绿光链路。实验结果验证了上述全双工 UWOC 系统设计思路的有效性。

表1 文件传输平均速率的实验结果

Table 1 The test result of the average transmission speed for document

距离/m	平均速率/Mbit/s	
	从“电脑1#”发送文件到“电脑2#”	从“电脑2#”发送文件到“电脑1#”
2.2	84.8	89.6
3.2	84.8	89.6
4.2	84.8	89.6
5.2	84.8	89.6
6.2	84.8	89.6
7.2	84.8	89.6
8.2	84.8	89.6
9.2	84.8	89.6
10.2	84.8	89.6
11.2	84.8	89.6
12.2	84.8	89.6
13.2	84.8	89.6

5 结束语

本文利用蒙特卡洛方法构建模型,定性研究了后向散射噪声进入接收机时的角度分布特征。仿真结果表明,后向散射噪声的角度分布比较分散;随着散射系数和接收孔径的增大,不同角度时的散射强度都明显增加;随着发射角的增大,小角度的后向散射减小,大角度的后向散射增多;随着通信设备中发射机与接收机间距的增加,不同角度时的散射强度都明显减小,大角度分量的减小速度相对而言较为缓慢。由于通信接收机中滤光片透射波长随着入射角度发生“蓝移”现象,这种角度分散的后向散射噪声主要对发射波长小于接收波长的通信设备产生影响。为了抑制这种噪声,在不影响 UWOC 系统链路建立效率、设备结构复杂度和有效通信距离等指标的前提下,可以适当减小通信发射角、接收孔径和视场,增大发射机与接收机的间距以及双向光信号的波长间隔。基于这种设计思路,本文采用450和520 nm的蓝绿光搭建了发射角和接收视场约50°的全双工 UWOC 系统,在2.2~13.2 m的通信距离内,两个链路分别实现了89.6和84.8 Mbit/s的文件传输速率。本文研究结果能够为设计全双工 UWOC 系统提供理论帮助。下一步研究中,将开展不同水体中后向散射噪声的角度分布实验以及更多商业化滤光片的角度特性测试,为全双工 UWOC 系统设计提供更为详细的优化方案。

参考文献：

- [1] 韩彪. 面向深海应用的水下双向无线光通信研究[D]. 西安: 中国科学院大学(中国科学院西安光学精密机械研究所), 2018.
Han B. Study on the Bi-directional Underwater Wireless Optical Communication for Deep Sea Application [D]. Xi'an, China: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2018.
- [2] Kaushal H, Kaddoum G. Underwater Optical Wireless Communication[J]. IEEE Access, 2016, 4: 1518–1547.
- [3] Zhu S, Chen X, Liu X, et al. Recent Progress in and Perspectives of Underwater Wireless Optical Communication[J]. Progress in Quantum Electronics, 2020, 73: 100274.
- [4] Zeng Z, Fu S, Zhang H, et al. A Survey of Underwater Optical Wireless Communications[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 19(1): 204–238.
- [5] Ishibashi S, Susuki K I. 1 Gbps \times 100 m Underwater Optical Wireless Communication Using Laser Module in Deep Sea [C]//OCEANS 2022. Hampton Roads, VA, USA: IEEE, 2022: 9976975.
- [6] Farr N E, Ware J D, Pontbriand C T, et al. Demonstration of Wireless Data Harvesting from a Subsea Node Using a “Ship of Opportunity” [C]//2013 OCEANS-San Diego. San Diego, CA, USA: IEEE, 2013: 6740998.
- [7] Pontbriand C, Farr N, Hansen J, et al. Wireless Data Harvesting Using the AUV Sentry and WHOI Optical Modem[C]//OCEANS 2015-MTS/IEEE Washington. Washington, DC, USA: IEEE, 2015: 7401985.
- [8] Sawa T, Nishimura N, Tojo K, et al. Practical Performance and Prospect of Underwater Optical Wireless Communication[J]. IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, 2019, E102. A(1): 156–167.
- [9] Zhang J, Wang S, Ma Z, et al. Long-term and Real-time High-speed Underwater Wireless Optical Communications in Deep Sea[J]. IEEE Communications Magazine, 2024, 62(3): 96–101.
- [10] Sonardyne. Pioneering the Future of Underwater Discovery[EB/OL]. (2024-03-01)[2025-01-03]. <https://www.sonardyne.com/>.
- [11] Hydromea. LUMA™ X [EB/OL]. (2024-05-01)[2025-01-03]. <https://www.hydromea.com/luma-underwater-communication?pgid=m3fsftsx-9cd7ce56-2d29-46f0-845b-55ba2dcfc9f9>.
- [12] Han B, Zhao W, Meng J, et al. Study on the Backscattering Disturbance in Duplex Underwater Wireless Optical Communication Systems [J]. Applied Optics, 2018, 57(29): 8478–8486.
- [13] Zhang X, Liu W, Huang N, et al. Orthogonal Waveform-based Backscattering Interference Suppression Technique for Underwater Optical Wireless Communication[J]. Journal of the Optical Society of America A, Optics, Image Science, and Vision, 2024, 41(7): 1372–1380.
- [14] 胡晓琳. 基于Ag微纳结构阵列的光学滤波器研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
Hu X L. Research of Optical Filter based on Ag Micro/Nano-structure Array[D]. Hangzhou, China: Zhejiang University, 2017.
- [15] 王杰, 范婷威, 申玲菲, 等. 全双工水下无线光通信系统自干扰问题研究[J]. 光通信研究, 2023(4): 28–33.
Wang J, Fan T W, Shen L F, et al. Study on Self-interference Problem in Full-duplex Underwater Wireless Optical Communication System [J]. Study on Optical Communications, 2023(4): 28–33.
- [16] 徐钟济. 蒙特卡罗方法[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1985.
Xu Z J. Monte Carlo Method [M]. Shanghai, China: Shanghai Publisher of Science and Technology, 1985.
- [17] Jonasz M, Fournier G. Light Scattering by Particles in water: Theoretical and Experimental Foundations[M]. New York, USA: Academic Press, 2007.
- [18] 石顺祥, 张海兴, 刘劲松. 物理光学与应用光学[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2000.
Shi S X, Zhang H X, Liu J S. Physical Optics and Applied Optics [M]. Xi'an, China: Xidian University Press, 2000.
- [19] Han B, Li X, Huang Z, et al. Experimental Demonstration of Half-duplex Underwater Wireless Optical Communication When Light Emitting Diode Illumination Noise Exists [J]. Optical Engineering, 2023, 62(9): 098101.
- [20] 亿照光电. 带通滤光片 [DB/OL]. (2024-02-12) [2025-01-03]. <https://www.yzlen.com/h-col-120.html>.
Yizhao Optoelectronics. Bandpass Filter [DB/OL]. (2024-02-12) [2025-01-03]. <https://www.yzlen.com/h-col-120.html>.
- [21] 华军软件园. 飞秋(FeiQ) [DB/OL]. (2024-05-12) [2025-01-03]. <https://www.onlinedown.net/soft/66046.htm>.
Nlinedown, net. FeiQ [DB/OL]. (2024-05-12) [2025-01-03]. <https://www.onlinedown.net/sofe/66046.htm>.