

激光与光电子学进展

水下光子时空随机信道模型的建立与仿真

戴伟辉, 鄢秋荣*, 王明, 杨程

南昌大学信息工程学院, 江西 南昌 330031

摘要 针对吸收和散射衰减导致光子在水下运动时具有复杂性的问题, 基于追踪的水下单光子运动状态, 建立了光子时空随机信道模型。针对不同的水质类型、链路距离、接收孔径、发射角和视场角, 统计了接收端到达光子的相关信息, 研究了基于水下单光子通信系统的光接收强度和信道脉冲响应的影响因素。同时, 综合考虑光子发射情况、水下光子运动过程、探测器特性和同步信号提取方法等, 采用了一种基于时隙内光子计数的数据解调方案, 并对系统性能进行分析。仿真实验结果表明: 发射角和接收孔径是影响时延展宽的主要因素; 接收孔径越大, 系统误码率(BER)越小; 而链路距离和发射角越大, 系统BER越大; 噪声系数越大, 系统BER越大, 且建模的理论通信距离约为 185 m。实验结果很好地描述了水下光子散射特性和脉冲时延展宽特性。

关键词 光通信; 水下通信; 光子时空随机信道模型; 蒙特卡罗方法; 信道特性; 系统误码率

中图分类号 TN929.14

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1706006

Establishment and Simulation of Underwater Photon Spatio-Temporal Random Channel Model

Dai Weihui, Yan Qiurong*, Wang Ming, Yang Cheng

Information Engineering School, Nanchang University, Nanchang, Jiangxi 330031, China

Abstract According to the complexity of photon motion under water caused by absorption and scattering attenuation, this paper establishes a photon spatio-temporal random channel model based on the tracked underwater single-photon motion state. Considering different types of water qualities, link distances, receiving apertures, launching angles, and field of view angles, the relevant information of the photons arrived at the receiving end was counted and the factors influencing optical receiving intensity and channel impulse response based on underwater single-photon communication system were studied. At the same time, comprehensively considering the photon emission, underwater photon movement process, detector characteristics, and synchronization signal extraction method, etc., a data demodulation scheme based on photon counting in the time slot was adopted and the system performance was analyzed. The simulation results show that the launching angle and receiving aperture are the main factors that affect the delay broadening. The larger the receiving aperture, the smaller the system bit error rate (BER); the larger the link distance, launching angle, and noise factor, the larger the system BER. The theoretical communication distance is about 185 m. The results well describe the characteristics of underwater photon scattering and pulse delay broadening.

Key words optical communications; underwater communication; photon spatio-temporal random channel model; Monte-Carlo method; channel characteristic; system bit error rate

OCIS codes 060.4510; 010.4450

收稿日期: 2020-12-09; 修回日期: 2021-01-09; 录用日期: 2021-01-20

基金项目: 国家自然科学基金(61865010, 61565012)、江西省杰出青年人才资助计划(20171BCB23007)

通信作者: *yanqiurong@ncu.edu.cn

1 引言

近年来,水下无线光通信受到各领域越来越广泛的关注,可以应用在诸如军事领域、生态保护监测、水下导航与控制、海上勘察等方面^[1-2]。目前,水下无线通信技术主要有电磁波通信技术、水声通信技术和光通信技术3类。电磁波通信抗噪声能力较强,但在水中衰减严重,且频率越大衰减越大,传输距离受限;水声通信可实现达千米级别通信距离,但存在通信速率较低、带宽利用率低、多径效应严重等缺点;而光通信具有速度快、容量大、绿色环保等优点,尤其是波长为450~530 nm的蓝绿激光在水下的衰减较其他波段光小得多,因此蓝绿激光作为窗口波段应用于水下通信是最优选择^[3-4]。

无线光通信系统发射端采用激光二极管(LD)或发光二极管(LED)作为光源,不同类型的光源发射角不同,从而产生的几何衰减程度也不同。激光发射功率较大,发射的光很集中且通信距离较远。而LED是一种绿色环保光源,价格低廉,但光源发射角较大^[5-6]。无线光通信系统接收端的光电探测器采用光电二极管(PIN)、雪崩光电二极管(APD)检测光信号,工作在模拟方式下,输出的是较小的电流信号,接收灵敏度较低,导致通信距离受限^[7-8]。为实现远距离通信,将单光子探测器(SPAD)用于检测光信号,输出一系列离散的随机单光子脉冲,可利用光子计数方法提取信号^[9-11]。

光在水中传播时会发生散射和吸收,是光强衰减的主要因素。此外,当高速率通信和长距离传输时,散射会导致脉冲展宽,从而产生误码^[12]。考虑

到这些影响因素,建立合适且逼真的信道模型是系统设计的关键,同时系统参数可适当调节,保证通信节点之间建立可靠的传输链路。目前大多数研究采用蒙特卡罗方法来建立水下信道模型,分析信道参数对信道特性的影响^[13-14]。文献[15]采用蒙特卡罗方法研究了水下光源的发射类型对通信系统传输距离的影响。文献[16]对信道估计和性能进行评估,利用蒙特卡罗方法建立了水下无线光信道模型。文献[17]综合了水下通信信道特性、光子发射和检测的泊松随机过程,使用蒙特卡罗方法建立了长距离弱链路水下无线光通信模型。文献[18]针对性地分析了水下激光脉冲传输的时延特性。文献[19]建立了光子计数水下无线光通信系统,并从接收到的离散脉冲中成功恢复原始信号。

为研究不同信道参数对水下单光子通信系统信道特性的影响,本文建立了水下光子时空随机信道模型,研究了基于水下单光子通信的光接收强度和信道脉冲响应的影响因素;同时,采用了一种基于时隙内光子计数的数据解调方案,并拟合出信道参数和系统误码率(BER)的关系曲线。

2 水下单光子通信系统及原理

图1为水下单光子通信系统。在发射端将经关键控(OOK)调制后的数字基带信号送入LED驱动电路,通过控制灯的亮、灭、闪烁来发送数据。发射端的衰减片和光栅可用于调节光强,内置准直器可减小发散角,透镜可聚焦光束。接收端同样内置准直器和透镜,单光子探测器用于收集光子,输出离散的单光子脉冲,通过数据处理还原信息。

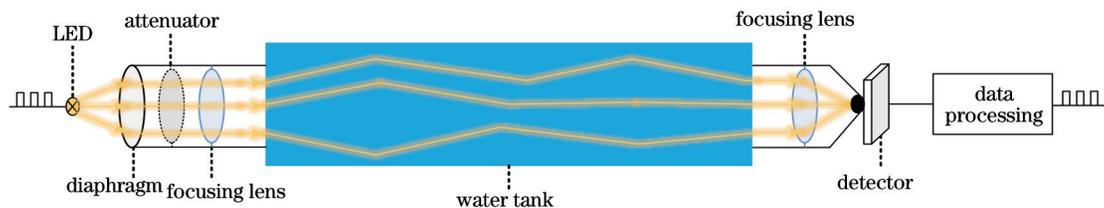


图1 水下单光子通信系统

Fig. 1 Underwater single-photon communication system

2.1 光子时空随机信道模型的建立

光子在水下信道运动具有随机性和复杂性,而蒙特卡罗方法又是一种能逼真地描述具有随机性质事物的统计方法,因此利用蒙特卡罗方法,通过计算机仿真实验建立光子时空随机信道模型,该模型可以准确模拟光子在水下运动的过程,并且能得到接近真实的实验结果。

2.1.1 光子初始条件

光子初始参数包括光子位置和方向,建立以光源处为原点,光源所在平面为 x - y 平面,光源和接收探测器中心连线为 z 轴的三维坐标。假设光源用点光源表示,光子的初始位置坐标为 $(0, 0, 0)$,方向余弦用 ν_x 、 ν_y 、 ν_z 表示。

光束中心发射平面上光子的发射角服从高斯

分布,光子发射角的表达式为

$$\theta = \theta_0 \sqrt{-\ln(1 - R_{\text{random}})}, \quad (1)$$

式中: θ_0 是光源最大的发射角; R_{random} 是 $[0, 1]$ 区间上随机选取的值。而方位角 ϖ 由于对称性,在区间 $[0, 2\pi]$ 服从均匀分布,表达式为

$$\varpi = 2\pi\delta, \quad (2)$$

式中: δ 是在 $[0, 1]$ 内均匀分布的随机数。

因此可以得到光子发射时的方向余弦表达式为

$$\begin{cases} \nu_x = \sin \theta \cdot \cos \varpi \\ \nu_y = \sin \theta \cdot \sin \varpi \\ \nu_z = \cos \theta \end{cases} \quad (3)$$

2.1.2 光子运动

光源将光子发射至水中,运动的光子会与水中的微颗粒和水分子等随机作用,发生散射和吸收衰减。水中光子的运动和水体光学参数有着密切联系,包括水的吸收系数 a 、散射系数 b ,它们都是以波长 λ 为变量的函数。水下光信号的衰减采用比尔定律信道模型来描述,故水下光接收强度公式^[20-21]为

$$I = I_0 \exp(-l), \quad (4)$$

式中: I_0 为初始强度;衰减长度 $l = [a(\lambda) + b(\lambda)]s$, s 为步长。对于均匀介质,在确定衰减长度 l 时,得出光子发生衰减的概率^[22]为

$$\psi_l = 1 - \exp(-l). \quad (5)$$

在利用蒙特卡罗方法建立光子时空随机信道模型时, ψ_l 是 $[0, 1]$ 区间上随机选取的值,也用

R_{random} 表示,则可以得出

$$l = -\ln(1 - R_{\text{random}}). \quad (6)$$

根据(4)式和(6)式,推出步长公式为

$$s = \frac{-\ln(1 - R_{\text{random}})}{a(\lambda) + b(\lambda)}. \quad (7)$$

光子在运动步长距离后可能会受到水中微颗粒的影响产生吸收和散射衰减,也可能不发生作用直接透射。定义反照率^[22]为

$$\epsilon = \frac{b(\lambda)}{a(\lambda) + b(\lambda)}. \quad (8)$$

(8)式用来表示光子在运动过程中发生散射衰减占总衰减的比例,由(5)式和(8)式可以推出光子运动步长距离后发生吸收和散射衰减的概率分别为

$$\psi_a = [1 - \exp(-l)] \cdot (1 - \epsilon), \quad (9)$$

$$\psi_b = [1 - \exp(-l)] \cdot \epsilon. \quad (10)$$

若水中微颗粒对光子产生吸收衰减或光子运动到范围之外,则代表该光子灭亡,接着追踪下一个光子;若光子不受水中微颗粒影响直接透射,则代表该光子沿原来方向继续运动下一个步长距离;若水中微颗粒对光子产生散射衰减,则代表该光子的运动方向会发生变化,需更新光子散射角 θ 和方位角 ϖ 。

对散射角 θ 进行建模,为充分描述光子在水中的小角度、大角度的前向散射和后向散射,采用 Two-Term Henyey-Greenstein (TTHG) 相位函数模型^[23],表达式为

$$P_{\text{TTHG}}(\theta', \alpha, \kappa, \tau) = \alpha P_{\text{HG}}(\theta', \kappa) + (1 - \alpha) P_{\text{HG}}(\theta', -\tau), \quad (11)$$

$$\tau = -0.3061446 + 1.000568\kappa - 0.01826332\kappa^2 + 0.03643748\kappa^3, \quad (12)$$

$$\alpha = \frac{\tau(1 + \tau)}{(\kappa + \tau)(1 + \tau - \kappa)}, \quad (13)$$

式中: P_{HG} 为 HG 散射相位函数表达式; α 为前向散射权重; κ 为前向散射函数中不对称参数; τ 为后向散射函数中不对称参数。为此推出散射角的余弦值表达式为

$$\cos \theta'(\alpha, \kappa, \tau) = \begin{cases} \cos \theta'(\kappa), R_{\text{random}} < \alpha \\ \cos \theta'(\tau), R_{\text{random}} \geq \alpha \end{cases}. \quad (14)$$

经过散射衰减后光子的方位角仍然在 $[0, 2\pi]$ 内服从均匀分布,光子将多次经过上述散射衰减或透射过程,直至到达接收端的探测器上才停止运动。

2.1.3 光子接收

光子经过水下运动发生衰减后到达接收端,能

否被探测器接收到取决于光子到达接收平面的位置、接收平面的孔径、光子运动方向和接收视场角。只有光子打在接收平面范围且光子运动方向在视场角范围内,探测器才可以接收到光子。通过对系统的分析和计算,可以认为视场角的表达式为

$$\alpha_{\text{FOV}} = 2\arctan\left(\frac{D_a - D_b}{2d}\right), \quad (15)$$

式中: D_a 和 D_b 分别为信道直径和接收平面的孔径; d 为信道和接收平面的距离。

2.2 水下单光子通信原理

图 2 是基于时隙内光子计数的数据解调过程, (a)~(e) 分别为同步头和数字基带信号、调制后

LED 发射的光子信号、探测器输出的单光子脉冲信号、同步信号以及解调信号。首先,在发送端产生 10 位“1010101010”的同步头和随机生成 10 位码元信息数据,作为一个数据包,也即图 2(a)所示的同步头和数字基带信号;采用 OOK 调制方法将同步头和数字基带信号加载在光源上,信号“1”代表发射光子,信号“0”代表不发射光子;由于在单位时间内,光源可以产生大量光子信号,从而在同步头和数字基带信号为

高电平时发射出对应密集的光子,如图 2(b)所示。由于水下信道的吸收、散射衰减和探测器的量子效率等原因,调制后 LED 发射的光子信号中大量光子灭亡;经探测器接收后输出一系列单光子脉冲信号,脉冲信号主要是 LED 发射的光子信号经过信道衰减产生的,也可能是暗计数和背景光等原因产生的,作为干扰的噪声光子;探测器输出的单光子脉冲信号如图 2(c)所示,其中虚线处表示噪声光子。

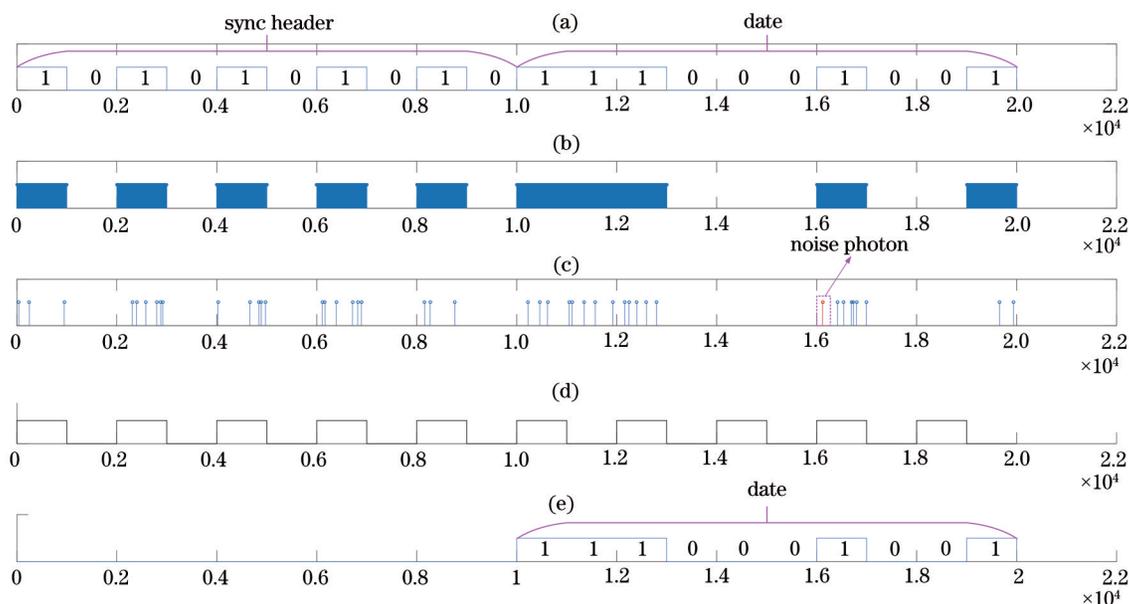


图 2 基于时隙内光子计数的数据解调过程

Fig. 2 Data demodulation process based on photon counting in time slot

其次,在整个单光子通信系统中,由于接收端探测器输出的是离散的单光子脉冲信号,因此可以采用光子计数方法从这些离散单光子脉冲信号中恢复数据,而恢复数据的前提是提取精准的时钟同步信号。先在接收端产生 25 路相位不同、周期相同的门控信号,各相邻门控信号间的相位差 p 是相同的,则 $25 \times p$ 等于门控信号的周期;然后在各门控信号的高电平期间,统计信道传输同步头信号时探测器输出的单光子脉冲数,该数值和门控信号高电平与同步头高电平的重叠部分宽度成正比;由于存在光子通量的波动、暗计数和探测器的量子效率等问题,可能有几路门控信号对应的光子计数值很接近,但计数值最大对应的门控信号与理想时钟同步信号的相位误差是最小的,可将其作为本次时钟同步信号^[19]。根据探测器输出的所有单光子脉冲信号提取的同步信号如图 2(d)所示。

最后,统计同步信号每个码元对应于信息数据的单光子脉冲数量,判断该数值和所设解调阈值的

大小关系,以确定解调信号电平。解调阈值设置为 2,当统计的光子数大于等于解调阈值时,解调信号为高电平“1”;当统计的光子数小于解调阈值时,解调信号为低电平“0”。从而得到 10 bit 信息数据的解调信号,如图 2(e)所示。

3 仿真结果及分析

3.1 水下单光子运动状态与统计分析

为更好模拟光子在水下的传播过程,对于能够进入水下信道的光子,统计该光子在水下运动发生作用时的位置、运动距离、时间和方向等时空信息。通过追踪每个光子的运动过程,保存光子在散射和吸收处的位置坐标,计算每个光子的运动总步长。在发送端发射 10^8 个光子时,水下信道空间中的部分光子运动轨迹如图 3 所示。可以得出:发送端发射出较多光子,而接收端只接收到极少的光子,体现了光子在水下信道传输过程中的衰减性质;同时,光子在水下运动过程中主要受水中微颗粒的吸收

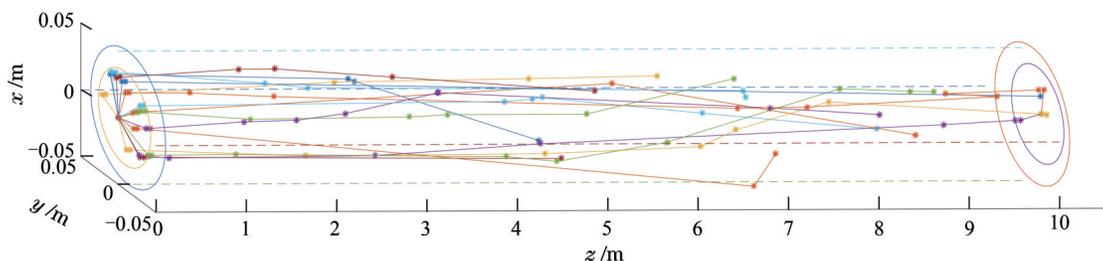


图 3 光子运动轨迹图

Fig. 3 Diagram of photon trajectory

衰减影响而灭亡,也存在一部分光子通过散射衰减逃离水下信道空间而灭亡;当然还有少部分光子通过多次前向散射衰减到达接收端,也存在极少部分光子会产生后向散射衰减。

同时,设置发射端光源发射 10^8 个光子,在光子传输过程中通过统计在不同距离平面处所有光子到达该距离平面上的位置坐标,并映射至各个像素点上,求出各个像素点的光子数,从而得到不同距离平面下的光子统计分布图,该图反映不同距离平面处光强的分布情况。图 4(a)~(f) 分别为发射端透镜平面、信道入口平面、水下信道 2 m 处平面、水下信道 5 m 处平面、水下信道 10 m 处平面、接收端透镜平面的光子统计分布。由图 4 可知,随着光子传输距离的增加,反映在光子统计分布图上的结果

就是各像素点越来越暗,代表接收到的光子数逐渐减少,光接收强度在不断减弱,这是光在水下传输过程中吸收和散射衰减导致的。另外,由于透镜和信道入口直径只有 7 cm,图 4(a)、(b)、(f) 光子统计分布的光源直径也是 7 cm;水下信道直径有 10 cm,图 4(c)、(d)、(e) 光子统计分布的光源直径也是 10 cm。此外,由于光源的发散性,所有平面下的光子统计分布图由中心点向外,像素点越来越暗,代表光强越来越弱;且随着传输距离的增加,光源发散性越来越强;而图 4(a) 到图 4(b) 之所以发散性减弱,是因为发射端凸透镜的聚焦作用。

3.2 水下信道特性分析

水下单光子信道的衰减性能与多种因素有关,包括光源、接收平面、链路距离和水质参数等。由于水质成分很复杂,不同海域有着不同类型的水质,相应的散射系数和吸收系数等参数也各不相同。采用 Sahu 等^[24] 实地测得的不同类型水质的散射系数和吸收系数,具体参数如表 1 所示,其中 c 为衰减系数。

表 1 不同类型水的散射、吸收、衰减系数

Table 1 Scattering, absorption, and attenuation coefficients of different types of water unit: m^{-1}

Water type	a	b	c
Clear water	0.114	0.037	0.151
Coastal water	0.179	0.219	0.398
Turbid harbor	0.366	1.824	2.190

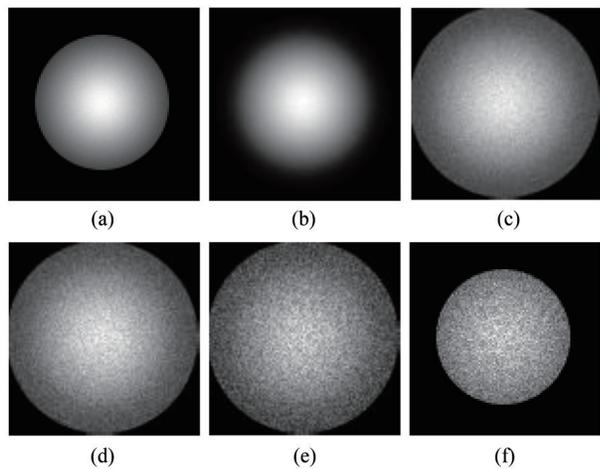


图 4 不同距离平面下的光子统计分布。(a) 发送端透镜平面; (b) 信道入口平面; (c) 水下信道 2 m 处平面; (d) 水下信道 5 m 处平面; (e) 水下信道 10 m 处平面; (f) 接收端透镜平面

Fig. 4 Photon statistical distributions in different distance planes. (a) Transmitter lens plane; (b) channel entry plane; (c) plane at 2 m of underwater channel; (d) plane at 5 m of underwater channel; (e) plane at 10 m of underwater channel; (f) receiver lens plane

另外,发射端光源光功率与对应时隙内的单光子脉冲数量之间的关系可以表示为

$$P_R = \frac{N_s h c'}{\lambda T}, \quad (16)$$

式中: P_R 为光源光功率; N_s 为光源发射的单光子脉冲数; h 为普朗克常量; c' 为光速; T 为码元宽度。

根据水下信道的吸收和散射衰减以及探测器的量子效率,接收端探测器输出的单光子脉冲数可

近似表示为

$$N_D = \eta \times \exp[-(a + b)L] \times N_s, \quad (17)$$

式中： η 表示探测器的量子效率； L 为通信距离。

此外，由于单位时间内光源可以产生大量光子，若以此来建模，仿真复杂度极高，计算机运行效率低下。因此为简化运算过程，发送端固定设置发送 10^8 个光子。在光源的真实功率为 1 W 的情况下，联合 (16) 式和 (17) 式可以推导出真实通信距离 (L_R) 与设置通信距离 (L_S) 的大致关系为

$$L_R = L_S + 182. \quad (18)$$

前文所述的距离均为设置通信距离，即仿真中程序设置的距离参数；后文所述距离均为真实通信距离，即建模中真正意义上可达到的通信距离。

图 5 给出了在不同的水类型、发射角、接收孔径和视场角 (FOV) 情况下，接收强度随距离的变化关系曲线。由图 5 可知，随着距离的增加，光接收强度逐渐减弱，这是由于距离的增加，光子在运动过程

中发生散射和吸收衰减的概率增大，接收平面接收到的光子也就越少，接收强度减弱。由图 5(a) 可知，不同类型水质接收强度不同，是因为不同类型水的衰减系数不同。港口海水衰减系数最大，从而接收强度最小；沿岸海水次之，接收强度居中；清洁海水衰减系数最小，接收强度最大。由图 5(b) 可知，在其他参数一致时，光源发射角越大，进入水下信道的的光子越少，光接收强度越弱。由图 5(c) 可知，在其他参数一致时，接收孔径越大，接收平面的面积也就越大，经过散射衰减后可接收到的光子越多，因此光接收强度越大。由图 5(d) 可知：对于清洁海水，在其他参数一致时，视场角对接收强度没有影响，这是因为在清洁海水中光子散射角很小，几乎与 z 轴平行；但对于其他类型水质而言，衰减系数大，导致散射角也较大，故视场角也较大，接收强度有微量的增加，但影响很小，基本可以忽略不计。

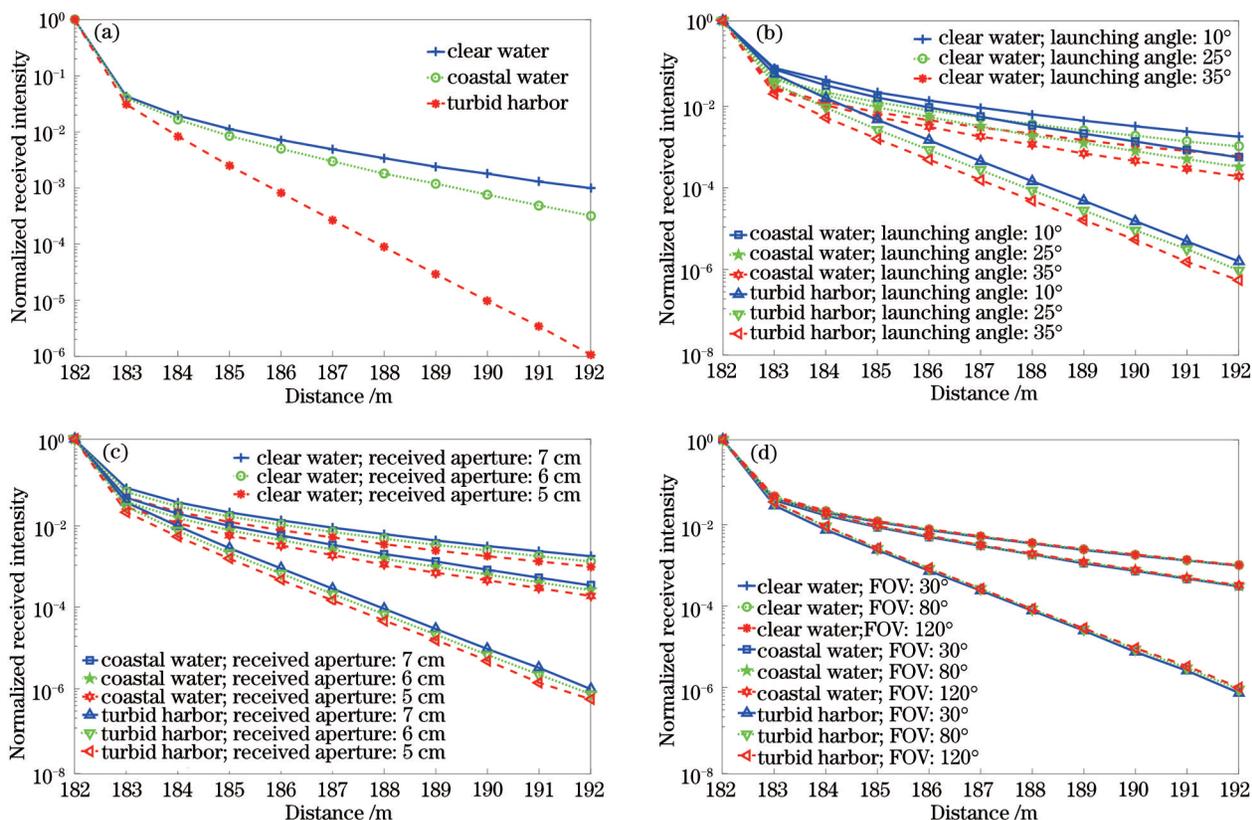


图 5 接收强度随距离的变化曲线。(a)不同的水类型；(b)不同的发射角和不同的水类型；(c)不同的接收孔径和不同的水类型；(d)不同的视场角和不同的水类型

Fig. 5 Received intensity versus distance. (a) Different water types; (b) different launching angles and different water types; (c) different received apertures and different water types; (d) different FOV and different water types

3.3 信道脉冲响应与系统误码率分析

光子在水下运动时会发生散射衰减，从而导致光

子运动路径的千变万化。因此，光子从发送端到接收端运动的实际步长各不相同，到达时间也有快慢，这

种现象称为时延展宽。根据统计得到的每个接收光子信息,可推出每个接收光子的实际运动时间为

$$t_p = \frac{s_{\text{sum}}}{c}, \quad (19)$$

式中: s_{sum} 代表每个光子运动总步长。

当水质类型为清洁海水时,可忽略视场角影响,在一定距离下得到不同发射角和接收孔径下的

信道脉冲响应,如图 6 所示。在其他条件相同时,光源发射角越大,时延展宽现象越严重,是因为散射角越大,光子运动的总步长越大;在其他条件相同时,接收孔径越大,时延展宽现象越严重,是由于接收面积越大,有越多的散射光子到达接收平面,时延越长,但时延相差不大。可以得知,光源发射角是影响时延展宽的主要因素。

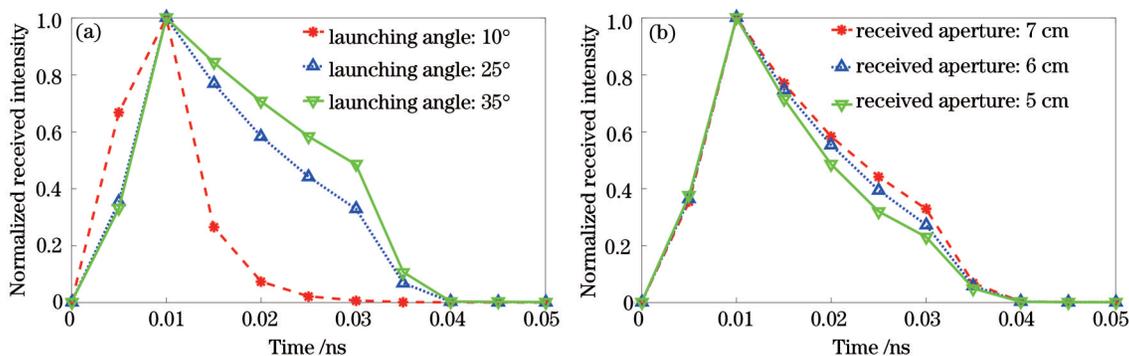


图 6 不同信道参数下的信道脉冲响应。(a)清洁海水中不同发射角;(b)清洁海水中不同接收孔径
Fig. 6 Channel impulse response under different channel parameters. (a) Different launching angles in clear water; (b) different received apertures in clear water

利用蒙特卡罗方法和光子计数方法,分别统计在不同信道参数下系统误码率的大小,得到的拟合

关系曲线如图 7 所示。图 7(a)~(c)分别代表链路距离、接收孔径、发射角与误码率的关系,通过各点

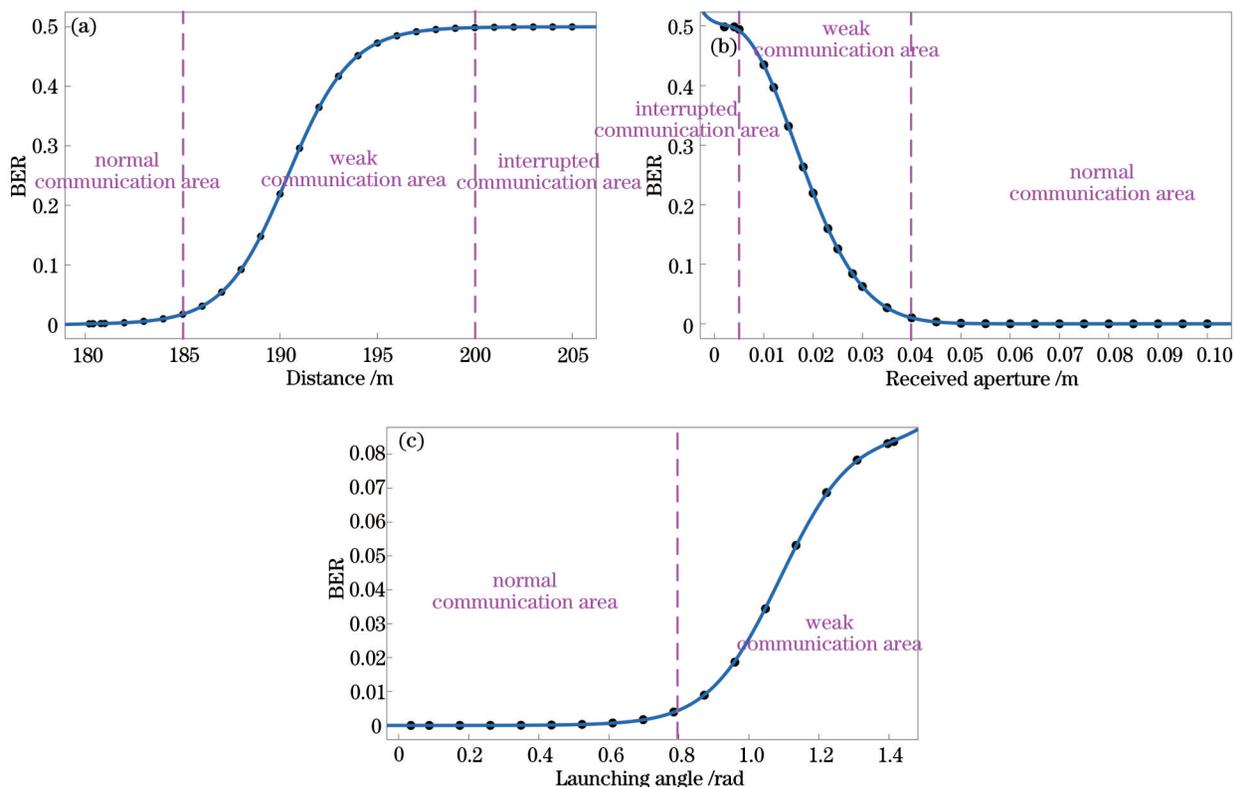


图 7 信道参数与误码率的关系。(a)距离对误码率的影响;(b)接收孔径对误码率的影响;(c)发射角对误码率的影响
Fig. 7 Relationship between channel parameters and BER. (a) Influence of distance on BER; (b) influence of received aperture on BER; (c) influence of launching angle on BER

拟合出误码率的曲线走势。图 7 中将误码率低于 10^{-3} 的区域定义为通信正常区,此时通过纠错编码可正常通信,通信质量优良;误码率在 0.5 左右的区域定义为通信中断区,此时不可以通信;其余区域为通信微弱区,此时超过纠错极限,无法有效提升通信质量,通信质量低下。

由图 7(a)可知:随着链路距离的增加,系统误码率逐渐增加;在通信微弱区,误码率增速先增大后减少,是由于开始时时隙内平均光子数已经达到解调阈值边缘,而随着距离增加,探测到的光子数逐渐减少,导致时隙内平均光子数逐渐小于解调阈值,从而误码率增速先增大,之后误码率增速减小并最终趋于 0,探测器此时只能探测到极度微弱光信号,且误码率已经开始接近极限;在通信中断区,系统误码率维持在 0.5 左右,表明探测器已探测不到有用光信号,此时探测全部输出数字信号“0”,因此系统误码率接近 0.5,说明理论通信距离可以达

到约 185 m。由图 7(b)可知:随着接收孔径的增加,系统误码率逐渐减少;在接收孔径小于 5 mm 时,系统处于通信中断区,误码率接近 0.5;在接收孔径超过 4 cm 后,误码率低于 10^{-3} ,此时系统处于通信正常区。由图 7(c)可知:随着光源发射角的增加,系统误码率逐渐增加,在发射角小于 0.8 rad 时,系统误码率缓慢增加,系统处于通信正常区;当发射角超过 0.8 rad 后,系统开始进入通信微弱区,此时系统误码率大幅增加,系统性能低下。

图 8 为在不同噪声系数下误码率随距离的关系曲线,噪声系数表示的是时隙内平均的噪声光子数。由图 8 可知,随着距离的增加,误码率增速先基本不变后增大,186 m 之前误码率增速整体是平缓的,186 m 后误码率增速整体是增大的,符合图 7(a)的曲线走势。同时,随着噪声系数的增加,系统误码率也逐渐增加。由此可知,噪声也是影响系统性能的重要因素。

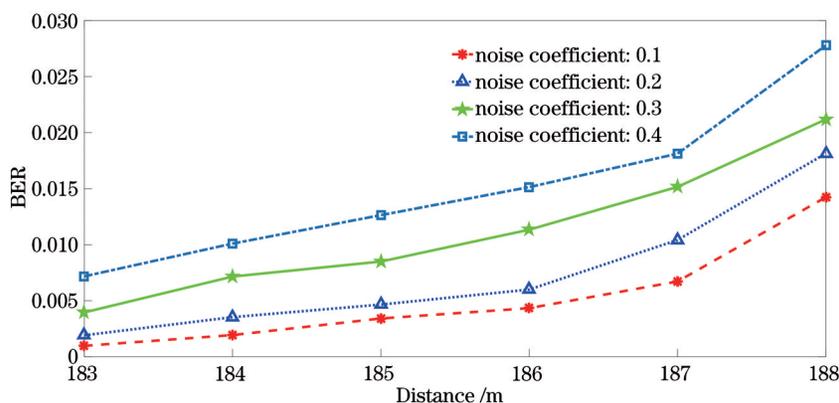


图 8 不同噪声系数下的距离与误码率的关系曲线

Fig. 8 Relationship between distance and BER under different noise factors

4 结 论

在简述水下单光子通信系统基本原理的基础上,建立了水下光子时空随机信道模型。基于此模型,详细分析了各光子的运动过程并保存了各光子运动状态。同时,根据追踪的各光子时空信息,及同步信号提取方法等,采用基于时隙内光子计数的数据解调方案,研究并分析了信道参数对信道脉冲响应与系统性能的影响。仿真结果表明:接收孔径和发射角越大,时延展宽越严重,发射角占主导因素;传输距离和发射角与接收强度成反比,接收孔径与接收强度成正比;发射角和噪声系数越大,系统误码率越大;接收孔径越大,系统误码率越小;传输距离越大,系统误码率越大并最终趋于一个平稳

值 0.5,且建模的理论通信距离约为 185 m。

参 考 文 献

- [1] Zeng Z Q, Fu S, Zhang H H, et al. A survey of underwater optical wireless communications[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 19(1): 204-238.
- [2] Kaushal H, Kaddoum G. Underwater optical wireless communication[J]. IEEE Access, 2016, 4: 1518-1547.
- [3] Mendez P A, James R. A comparative study of underwater wireless optical communication for three different communication links[J]. IOSR Journal of Electronics and Communication Engineering, 2015, 10(3): 40-48.
- [4] Wang T, Han B, Shi K, et al. Underwater LED

- communication based on secondary light distribution with total internal reflection lens[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(8): 0806001.
- 王涛, 韩彪, 史魁, 等. 基于全内反射透镜二次配光的水下 LED 通信研究[J]. *光学学报*, 2019, 39(8): 0806001.
- [5] Xu J, Kong M W, Lin A B, et al. OFDM-based broadband underwater wireless optical communication system using a compact blue LED[J]. *Optics Communications*, 2016, 369: 100-105.
- [6] Tian P F, Liu X Y, Yi S Y, et al. High-speed underwater optical wireless communication using a blue GaN-based micro-LED[J]. *Optics Express*, 2017, 25(2): 1193-1201.
- [7] Huang X X, Wang Z X, Shi J Y, et al. 1.6 Gbit/s phosphorescent white LED based VLC transmission using a cascaded pre-equalization circuit and a differential outputs PIN receiver[J]. *Optics Express*, 2015, 23(17): 22034-22042.
- [8] Liu N S, Wang C, Xu Z Y, et al. Research progress of photon-counting based on optical wireless communication[J]. *Communications Technology*, 2019, 52(7): 1584-1591.
- 刘宁松, 汪琛, 徐智勇, 等. 光子计数无线光通信研究进展[J]. *通信技术*, 2019, 52(7): 1584-1591.
- [9] Han B, Zhao W, Wang W, et al. Modified photon counting communication method for underwater application[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(8): 0806004.
- 韩彪, 赵卫, 汪伟, 等. 面向水下应用的改进型光子计数通信方法[J]. *光学学报*, 2016, 36(8): 0806004.
- [10] Wang C, Yu H Y, Zhu Y J, et al. Multi-LED parallel transmission for long distance underwater VLC system with one SPAD receiver[J]. *Optics Communications*, 2018, 410: 889-895.
- [11] Wang C, Yu H Y, Zhu Y J, et al. Experimental study on SPAD-based VLC systems with an LED status indicator[J]. *Optics Express*, 2017, 25(23): 28783-28793.
- [12] Li T S, Yang R K, Gao X, et al. Impulse response modeling for underwater wireless laser transmission[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(11): 1101001.
- 李天松, 阳荣凯, 高翔, 等. 水下无线激光传输脉冲响应建模[J]. *光学学报*, 2019, 39(11): 1101001.
- [13] Dong F B, Xu L M, Jiang D G, et al. Monte-Carlo-based impulse response modeling for underwater wireless optical communication[J]. *Progress in Electromagnetics Research M*, 2017, 54: 137-144.
- [14] Gabriel C, Khalighi M A, Bourennane S, et al. Monte-Carlo-based channel characterization for underwater optical communication systems[J]. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, 2013, 5(1): 1-12.
- [15] Zhou L J, Zhou D, Zeng W B, et al. Simulation analysis of undersea wireless optical communication system based on flat-topped beam[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(7): 070603.
- 周龙杰, 周东, 曾文兵, 等. 基于平顶光束的水下无线光通信系统的仿真分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(7): 070603.
- [16] Qadar R, Kasi M K, Ayub S, et al. Monte Carlo-based channel estimation and performance evaluation for UWOC links under geometric losses[J]. *International Journal of Communication Systems*, 2018, 31(6): e3527.
- [17] Hong Z, Yan Q R, Li Z H, et al. Monte Carlo simulation and implementation of underwater single photon communication system[J]. *Proceedings of SPIE*, 2020, 11427: 1142737.
- [18] Gabriel C, Khalighi M A, Bourennane S, et al. Channel modeling for underwater optical communication [C]//2011 IEEE GLOBECOM Workshops (GC Wkshps), December 5-9, 2011, Houston, TX, USA. New York: IEEE Press, 2011: 833-837.
- [19] Yan Q R, Li Z H, Hong Z, et al. Photon-counting underwater wireless optical communication by recovering clock and data from discrete single photon pulses[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019, 11(5): 1-15.
- [20] Li T S, Yang R K, Huang Y H, et al. Simulation and analysis of time delay characteristics of underwater laser pulse[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(11): 110102.
- 李天松, 阳荣凯, 黄艳虎, 等. 水下激光脉冲时延特性的仿真分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(11): 110102.
- [21] Yu X Y. A study on channel characteristics for underwater wireless optical communication[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017: 1-80.
- 余翔宇. 水下无线光通信系统的信道特性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017: 1-80.
- [22] Cox W C. Simulation, modeling, and design of underwater optical communication systems[D]. Raleigh: North Carolina State University, 2012: 1-277.
- [23] Haltrin V I. One-parameter two-term Henyey-Greenstein phase function for light scattering in seawater[J]. *Applied Optics*, 2002, 41(6): 1022-1028.
- [24] Sahu S K, Shanmugam P. A theoretical study on the impact of particle scattering on the channel characteristics of underwater optical communication system[J]. *Optics Communications*, 2018, 408: 3-14.