

# 水下无线光通信系统信道冲激响应拟合函数对比分析

谭跃跃, 李岳衡\*, 黄平, 刘陕陕, 居美艳

河海大学计算机与信息学院, 江苏 南京 211100

**摘要** 鉴于目前尚未有用于拟合清澈海洋水质信道冲激响应(CIR)曲线的函数,提出一种使用双指数函数拟合清澈海洋水质 CIR 曲线的方法,并与现有的其他 4 种拟合函数如单伽马、逆高斯、双伽马、CEAPF 进行对比,以揭示所提方法的优势。在不同海水水质、传输距离、接收机视场角条件下,研究 5 种拟合函数各自的拟合效果和适用范围,并通过蒙特卡罗仿真实验加以验证。理论分析和仿真结果表明:所提双指数函数不仅在清澈海洋水质下的拟合效果很好,浑浊海港水质下的拟合效果也相当不错,特别是在短距离(比如 10 m)清澈海洋水质、各种传输距离和视场角的浑浊海港水质下,皆超越其他 4 种函数的拟合性能。原用于拟合大气环境 CIR 的单伽马函数也可用于拟合清澈海洋和浑浊海港两种水质的 CIR;采用逆高斯函数拟合清澈海洋、近海海岸、浑浊海港三种水质的 CIR 都有较大误差;双伽马函数则可较好地拟合近海海岸和浑浊海港这两种浑浊水质下的 CIR,但却无法拟合清澈海洋的 CIR;CEAPF 函数总体上可用于拟合三种水质的 CIR,且取得了不错的拟合效果。

**关键词** 光通信; 水下无线光通信; 信道冲激响应; 蒙特卡罗仿真; 数据拟合; 双指数函数

中图分类号 TN929.3

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1106001

## Comparative Analyses of Fitting Functions for Channel Impulse Response in Underwater Wireless Optical Communication Systems

Tan Yueyue, Li Yueheng\*, Huang Ping, Liu Shanshan, Ju Meiyuan

School of Computer and Information, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 211100, China

**Abstract** Owing to the lack of a particular function to fit the channel impulse response (CIR) curves in clear ocean water, a method of fitting CIR curves of clear ocean water using double exponential function is proposed in this article. The proposed double exponential function is compared with four other well-known fitting functions—single Gamma, inverse Gaussian, double Gamma, and CEAPF—to show its superiority. Moreover, we compare and analyze the fitting performance and working range of these five functions under different conditions of seawater quality, link range, and field of view (FOV) of the receiver, and these are verified by Monte Carlo simulation experiment. Both theoretical analyses and simulation results suggested that the proposed double exponential function could achieve an accurate fitting performance not only in clear ocean water but also in harbor water and could outperform the four other functions, especially in a short link range of clear ocean water (e. g., 10 m) and in harbor water case with different link ranges and FOVs. From the results, the single Gamma function used to match the CIR curves in the atmospheric environment could also be used to fit the ones in clear ocean water and harbor water, whereas the inverse Gaussian function deviated the CIRs under any working case with larger errors; the double Gamma function could fit the CIR of coastal water and harbor water but could not fit that of clear ocean water; the CEAPF function could generally fit well with the CIRs in the three ocean water qualities and obtain good fitting results.

**Key words** optical communications; underwater wireless optical communication; channel impulse response; Monte Carlo simulation; data fitting; double exponential function

收稿日期: 2020-11-20; 修回日期: 2020-12-09; 录用日期: 2020-12-30

基金项目: 中央高校基本科研业务费项目(2019B15714)、国家自然科学基金(61832005)

\* E-mail: yueheng\_li@hhu.edu.cn

## 1 引言

随着无线通信技术的快速发展和人类对海洋探索的日渐深入,人们对水下高速、可靠无线通信的需求越来越迫切。在此背景下,水下无线光通信(UWOC)以高信息传输速率、大带宽、低延迟等巨大优势而吸引了众多科研工作者的关注,并逐渐成为近年来无线通信领域新的研究热点<sup>[1-2]</sup>。比较而言,陆地自由空间光通信(FSO)的研究已开展了数十年,理论与技术发展日趋完善。显然,若能将FSO的有关技术加以改进以适应水下独特的环境,是加速UWOC研究进程的有力手段。不过,为了将FSO技术移植到海洋水下环境,建立体现UWOC信道传输特性的信道模型就成为第一步需要完成的工作。

基于计算机蒙特卡罗数值仿真的UWOC系统信道特性模拟<sup>[3-4]</sup>,是近些年来普遍采用的一种通过模拟光子在传输介质中的散射运动轨迹,进而获取信道传输特征的方法。其基本原理为:将光源发射的光束在海水中的传输过程看成是光子在水中沿传输方向进行前向或后向运动的过程。由于光子在海水中传输时会出现和水中诸如叶绿素、溶解的有机物、无机盐或浮游生物等微粒发生碰撞,进而出现不同程度的散射运动和能量吸收的情况,接收机通过统计这些发射光子到达接收平面的数量、权重、运动路径等信息,可得到不同传输环境和收发条件下信道冲激响应(CIR)、相对接收功率等关键信道特征。

目前,国内外通过蒙特卡罗仿真法来研究不同海洋水质下UWOC系统的CIR曲线,已经取得不少成果<sup>[3-6]</sup>,但这些仿真曲线都是以具体数值的形式给出的,不便于后续在诸如系统误码率、信道容量等理论层面的推导与分析,因此需采用数学拟合的方法,根据不同的CIR曲线数值来获得对应的闭型拟合函数表达。2009年,Ding等<sup>[7]</sup>使用单伽马函数来拟合非视距紫外光在大气环境中传输时的CIR曲线,该方法虽只有3个待优化的系数,但确实可以在某种程度上拟合UWOC系统的CIR曲线。2011年,Wei等<sup>[8]</sup>使用逆高斯函数来拟合水下光信道CIR曲线,但实验仿真只限定在较短的传输距离和水池模拟的较清澈的海水水质参数,并未考虑实际的海水水质状况,且未给出基于逆高斯函数的CIR理论形状与其相应的蒙特卡罗仿真数据之间的比

较。2014年,Tang等<sup>[9]</sup>使用双伽马函数来拟合近海海岸和浑浊海港这两种较浑浊海水水质(即多散射环境)下的CIR,取得了较好的拟合效果,但双伽马函数无法拟合在清澈海洋水质下的CIR曲线。2018年,Li等<sup>[10]</sup>通过整合指数函数与任意阶幂函数的CEAPF函数来拟合海岸及海港水质的CIR曲线,并与双伽马函数进行比较。

从上述国内外有关UWOC系统CIR仿真数据的拟合工作来看,针对水下环境CIR曲线的函数拟合主要集中在海岸和海港两种水质情形(包括双伽马和CEAPF函数),而关于常见的清澈海洋水质的CIR曲线研究并未有论文直接正面涉及。基于这一局限,本文提出一种双指数函数来拟合清澈海洋水质下的CIR仿真数据,并与各拟合函数进行对比以揭示双指数函数的优越性;同时,在不同水质、传输距离、视场角(FOV)下,对不同拟合函数的拟合性能进行对比仿真研究,从而揭示这些函数不同的适用范围。这些研究成果将为今后选取合适的CIR拟合函数以进一步分析UWOC系统的各项理论性能奠定基础。

## 2 信道冲激响应拟合函数

### 2.1 单伽马函数

单伽马函数最早被提出出来是用于拟合非视距紫外光在大气环境中传输时的CIR曲线<sup>[7,11-12]</sup>,由于其表达式的简单性而被本文考虑直接移植到UWOC系统。单伽马函数的表达式为

$$h(\Delta t) = \frac{A\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} \Delta t^{\alpha-1} \exp\left(-\frac{\Delta t}{\beta}\right), \quad (1)$$

式中: $\Gamma(\cdot)$ 为Gamma函数; $\Delta t$ 为光子到达接收机的相对传输时间; $A$ 为尺度因子; $\alpha$ 和 $\beta$ 为模型参数。 $A$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$ 这三个待优化的参数可以根据最小二乘准则,通过非线性拟合得到:

$$(\hat{A}, \hat{\alpha}, \hat{\beta}) = \underset{A, \alpha, \beta}{\operatorname{argmin}} \int_0^\infty [h_{MC}(\Delta t) - h(\Delta t)]^2 d\Delta t, \quad (2)$$

式中: $h(\Delta t)$ 为目标单伽马函数; $h_{MC}(\Delta t)$ 为蒙特卡罗仿真获得的有关UWOC系统的CIR数值;符号 $\operatorname{argmin}(\cdot)$ 是返回括号中所描述的目标函数取最小值时的待优化参数的算子。

### 2.2 逆高斯函数

文献<sup>[8]</sup>中,用于拟合UWOC系统CIR波形的逆高斯函数的表达式为

$$h(\Delta t) = \left[ \frac{\alpha}{2\pi\Delta t^3} \right]^{\frac{1}{2}} \exp\left( \frac{-\alpha(\Delta t - \beta)^2}{2\beta^2\Delta t} \right). \quad (3)$$

在已获得 UWOC 系统 CIR 仿真数值  $h_{MC}(\Delta t)$  的基础上,为利用类似于(2)式的非线性最小二乘准则来计算逆高斯函数的两个待确定变量  $\alpha$  和  $\beta$ ,可借助数学统计中已知的有关逆高斯分布参数的极大似然估计,来确定进行非线性最小二乘计算时所需的迭代初值  $\alpha_0$  和  $\beta_0$ 。已知逆高斯分布的概率密度函数为

$$f(x) = \begin{cases} \frac{\sqrt{\alpha}}{\sqrt{2\pi x^3}} \exp\left[ -\frac{\alpha(x - \beta)}{2\beta^2 x} \right], & x > 0, \\ 0, & x \leq 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中:位置参数  $\beta > 0$ ,其极大似然估计值<sup>[13]</sup>为

$$\hat{\beta} = \beta_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i, \quad (5)$$

式中: $X_i$  为服从逆高斯分布的随机数样本; $n$  为样本个数。形状参数  $\alpha > 0$ ,其极大似然估计值<sup>[13]</sup>为

$$\hat{\alpha} = \alpha_0 = n / \sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{X_i} - \frac{1}{\bar{X}} \right), \quad (6)$$

式中: $\bar{X}$  为样本均值。计算时需注意,已有的蒙特卡罗仿真数据比原始逆高斯的概率密度函数多一个尺度因子。

### 2.3 双伽马函数

双伽马函数最早是由美国学者 Mooradian 等提出的一种用于描述蓝-绿激光通过大气中的云层时信道传输特性的拟合函数<sup>[14]</sup>。后来 Tang 等<sup>[9]</sup>将其移植到 UWOC 系统用以拟合海岸和海港这两种浑浊水质的 CIR,并取得不错的拟合效果。适合于 UWOC 系统 CIR 曲线拟合的双伽马函数的表达式<sup>[9]</sup>为

$$h(t) = C_1 \cdot \Delta t \cdot \exp(-C_2 \cdot \Delta t) + C_3 \cdot \Delta t \cdot \exp(-C_4 \cdot \Delta t), \quad (7)$$

式中: $\Delta t = t - t_0$ ,  $t_0$  为光子通过直达径到达接收机的时间,显然有  $t_0 = L/v$ ,  $L$  为传输距离,  $v$  为光在海水中的运动速度;系数  $(C_1, C_2, C_3, C_4)$  为 4 个待确定的参数。

采用双伽马函数可以取得关于浑浊水质 CIR 数据比较理想的拟合效果,其原因在于:根据 Mooradian 等的现场测试,蓝-绿激光在通过含有众多悬浮颗粒的云层时,接收机接收到的总能量可以由两部分构成,一部分是经多阶散射后接收到的多散射能量,另一部分则是经低阶散射和直达径后接收到的低散射能量;在浑浊水质的 UWOC 系统中,

考虑到光子从发射到被接收也会经历类似的过程,因此采用两个伽马函数的线性组合以分别表示多阶散射和低阶散射的叠加接收,最终能取得较好的拟合效果。

### 2.4 CEAPF 函数

包括海岸和海港水质在内的浑浊海水的 CIR 曲线有一个明显的特征,即光子直达时间  $t_0$  或者相对传输时间  $\Delta t$  之后的一段 CIR 曲线存在先上升再下降的变化趋势,即浑浊水质的 CIR 为具有某种程度山峰状的曲线,并且随着传输距离和衰减系数的增加,峰值部分曲线会越来越平缓,时延展宽也越来越大。这是因为,浑浊水质的衰减系数比较大,蒙特卡罗仿真中模拟的光子一步到达接收平面的情况基本不存在,也就是光子会随机运动一段大于  $L$  的路径才能到达接收平面,并于随后一段时间达到接收峰值<sup>[5]</sup>。双伽马函数拟合正是通过采取两个伽马函数分别代表多阶散射能量和低阶散射能量,及由每个伽马函数中指数项前面的  $\Delta t$  项来模拟 CIR 曲线的上升沿,从而匹配这一信道特性。

针对浑浊水质 CIR 曲线的这一特征, Li 等<sup>[10]</sup>提出了一个无有组合项的 CEAPF 函数来解决这一问题,函数表达式为

$$h(t) = C_1 \frac{\Delta t^\alpha}{(\Delta t + C_2)^\beta} \cdot \exp[-c \cdot v(\Delta t + t_0)], \quad (8)$$

式中: $c$  为海水水质的衰减系数;  $(C_1, \alpha, C_2, \beta)$  为 4 个待优化的参数;指数项  $e^{-c \cdot v(\Delta t + t_0)}$  用于模拟浑浊水质中吸收系数对 CIR 的影响<sup>[6]</sup>;而散射系数的影响则由两个幂函数的分式来控制,其中幂函数  $\Delta t^\alpha$  用于控制 CIR 曲线的上升段,  $(\Delta t + C_2)^\beta$  则用于控制曲线的下降段;在满足  $\beta > \alpha$ 、 $\Delta t$  远大于  $C_2$  的情况下,  $h(t)$  退化为伽马函数,其值趋于 0;  $C_1$  为控制函数幅度的尺度因子。4 个优化系数  $(C_1, \alpha, C_2, \beta)$  同样可以采用非线性拟合来求解。

### 2.5 双指数函数

本文提出一种双指数函数,以拟合清澈海洋水质 UWOC 系统的蒙特卡罗 CIR 仿真数据,设计理由概述如下:1)清澈海洋水质的衰减系数较小,在蒙特卡罗仿真过程中,有大量的光子运动一个步长就能到达或者超越接收端,导致 CIR 曲线不会出现如浑浊水质中 CIR 有一定上升和下降段的脉冲波形,因此像逆高斯和双伽马含有  $\Delta t$  因子的函数将无法拟合清澈海洋水质下的 CIR,而单伽马和 CEAPF 函数虽然可通过调整  $\alpha$  或  $\beta$  因子来消除  $\Delta t$  的影响,

但其拟合效果尚需通过仿真加以评估;2)清澈海洋水质中的杂质虽然远少于浑浊水质,但依然含有大量溶解于水的有机物、无机盐,及较少浓度的叶绿素等影响光子吸收和散射的因素,即清澈海洋环境下也不能忽略海水的散射效应,故只体现 Beer-Lambert 纯吸收衰减定律<sup>[4]</sup>的单指数函数将不能准确拟合清澈海洋水质的 CIR;3)Mobley<sup>[15]</sup>指出,当从理论上直接求解光辐射传输方程以获得光子在水中的传输损耗时,若额外考虑非弹性散射项的影响,相当于在原不考虑该因素而获得单指数衰减解的基础上线性叠加另一近似指数衰减项,这一结论为采用双指数函数来模拟清澈海洋环境的 CIR 提供了最直接的理论佐证;4)事实上,Mooradian<sup>[14]</sup>提供的实验测试数据与结论也间接印证了用双指数函数拟合清澈海洋水质 CIR 的合理性,即一个指数项用于模拟低阶散射和直达径,另一个指数项用来模拟高阶散射,这与双伽马函数的提出原理类似;5)从仿真结果也可以看出,在所有的拟合函数中,双指数函数拟合清澈海洋水质的 CIR 时误差很小,且模拟浑浊

水质的 CIR 时也获得很好的效果。

基于上述理论分析和清澈海洋水质 CIR 曲线具有单调下降特性的事实,用于拟合 UWOC 系统清澈海洋水质 CIR 曲线的双指数函数的表达式设为

$$h(t) = c_1 \cdot \exp(c_2 \cdot \Delta t) + c_3 \cdot \exp(c_4 \cdot \Delta t), t \geq t_0, \quad (9)$$

式中: $(c_1, c_2, c_3, c_4)$ 为 4 个待确定的优化系数,可以通过类似于(2)式的表达式,采用非线性最小二乘拟合函数计算获得。

### 3 模型应用与仿真比较

#### 3.1 仿真参数的设定与拟合系数获取

为了比较各 CIR 拟合函数的拟合效果,首先需要搭建基于蒙特卡罗仿真的 UWOC 系统信道特性仿真平台,基本原理与实现步骤可参见文献[3]和文献[4]。而通过蒙特卡罗方法模拟光子从发射端到接收端的物理流程则可参考图 1,具体步骤不再赘述。其中  $b$  是海水水质的散射系数, $r_d$  是服从  $[0, 1]$  均匀分布的随机数, $T$  是阈值。

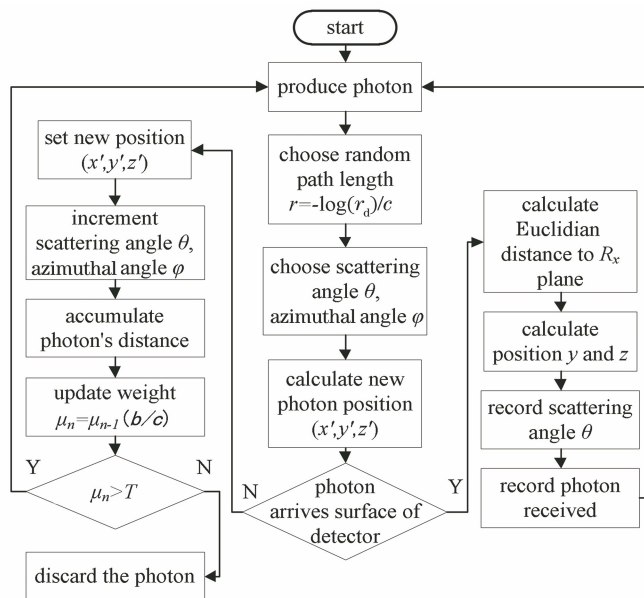


图 1 UWOC 系统蒙特卡罗仿真流程图

Fig. 1 Flowchart of Monte Carlo simulation in UWOC system

平台参数设定与配置:散射相函数采用 Mobley 基于 Petzold 经典实验数据<sup>[16]</sup>计算获得的平均粒子相函数<sup>[15]</sup>;三种典型海水水质的吸收、散射与衰减系数如表 1 所示,其中清澈海洋水质的参数取自文献[5],海岸与海港两种水质的参数则来自于文献[9];信道特性仿真所需的其他主要参数如表 2 所示;为简便分析问题,假设发射端和接收端对准放置<sup>[17]</sup>。

表 1 不同海水水质的吸收、散射与衰减系数

Table 1 Absorption, scattering, and attenuation coefficients in different water types

Water type	Absorption coefficient / $m^{-1}$	Scattering coefficient / $m^{-1}$	Attenuation coefficient / $m^{-1}$
Clear ocean	0.069	0.080	0.150
Coastal	0.179	0.219	0.398
Harbor	0.366	1.824	2.190

表 2 Monte Carlo 仿真 CIR 曲线的主要参数  
Table 2 Key parameters of CIR curve simulated  
by Monte Carlo

Parameter	Value
Beam width /mm	3
Divergence angle (full angle) /( $^{\circ}$ )	10
Wavelength /nm	532
Number of photons	$10^9$
Aperture of detector /cm	50
Survival threshold	$10^{-6}$
Link range /m	10-50
Field of view(FOV) /( $^{\circ}$ )	20,40,180

在仿真过程中还有一个非常重要的环节,即确定各拟合函数的系数。本文给出一种可行的最优拟合系数求解方法,算法要点如下。

1)采用 Matlab 软件优化工具箱中的非线性最小二乘拟合函数 Lsqcurvefit,来求解类似于(2)式的最小二乘拟合问题。

2)Lsqcurvefit 迭代初值的确定。①单伽马函数:将  $A\beta^{-\alpha}/\Gamma(\alpha)$  整体视为一个新的待确定系数,然后在(1)式两边取对数,将相关数据代入并建立超定方程组,即可得到对应系数的准确迭代初值。②逆高斯函数:按(5)和(6)式给出的极大似然估计即可方便地计算迭代初值。③双伽马和双指数函数:鉴于  $h(t)$  是由高阶散射和低阶散射两部分因素构成的,设定一个按步长递增的可变权重  $0 < \omega < 1$ ,将(7)或(9)式等号右边的双函数分成两个单函数并令其分别等于  $\omega \cdot h(t)$  和  $(1-\omega) \cdot h(t)$ ,再对两边取对数、建立超定方程组,即可求解对应某个  $\omega$  值的迭代系数初值;将该迭代系数初值代入 Lsqcurvefit,求解拟合目标函数  $h(t)$ ,并计算出与蒙特卡罗仿真的 CIR 数值  $h_{MC}(t)$  的平方根均方根误差(RMSE);变化  $\omega$ ,选取具有最小 RMSE 的拟合系数即可。④CEAPF 函数:(8)式两边分别取对数,建立超定方程组,将  $\ln(\Delta t + C_2)^\beta$  作为一个整体未知量  $x$  来求解,对方程  $\ln(\Delta t + C_2)^\beta = x$  两边再次取对数,建立超定方程组后就可得到最后全部的拟合系数初值。

### 3.2 不同海洋水质下拟合函数性能

假设接收机位于发射光轴上,接收平面的法线与光轴重合,传输距离设为 10 m,视场角为  $180^{\circ}$ 。分别在清澈海洋、近海海岸和浑浊海港三种不同的水质下,首先通过蒙特卡罗仿真平台获得 UWOC 系统的 CIR 仿真数据,随后分别获取单伽马、逆高斯、双伽马、CEAPF 和双指数函数的最优拟合表达

式,并借助 Matlab 软件绘出不同水质下相应的原始 CIR 曲线及各拟合函数曲线,如图 2~4 所示。同时,为了更精准地展现不同拟合函数间的拟合差异,还通过数值计算的方式给出了不同拟合函数与 CIR 蒙特卡罗仿真数据间的 RMSE 比较,如表 3 所示。

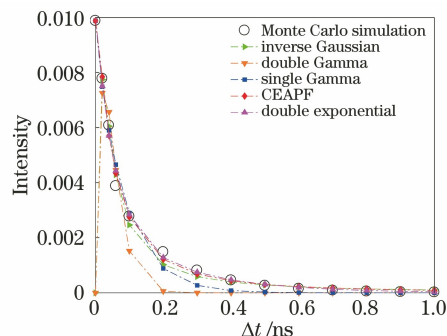


图 2 清澈海洋水质下 Monte Carlo 仿真 CIR 曲线与各拟合函数曲线对比

Fig. 2 Comparison between CIR curve simulated by Monte Carlo and various function fitting curves in clear ocean water

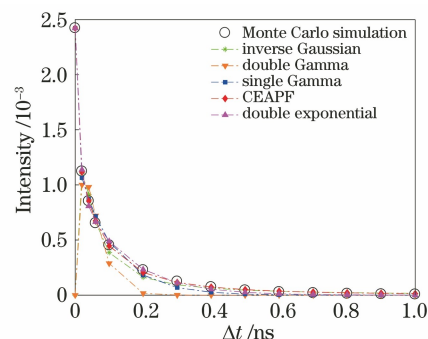


图 3 近海海岸水质下 Monte Carlo 仿真 CIR 曲线与各拟合函数曲线对比

Fig. 3 Comparison between CIR curve simulated by Monte Carlo and various function fitting curves in coastal water

图中纵坐标表示归一化接收强度,即在相同时间内,接收机接收到总的光子权重与发射机发射的初始总光子权重之比。由图 2 和图 3 的仿真数据可以看出:当传输距离为 10 m 时,清澈海洋和近海海岸水质中的 CIR 曲线都具有明显的类似于单边下降的指数函数特性,逆高斯和双伽马函数的拟合线形却出现不需要的尖峰,从而无法准确表示这种水质下原始 CIR 的特性和趋势;相反,单伽马、CEAPF 和双指数函数都能比较好地拟合 CIR 曲线。原因是:逆高斯和双伽马函数的表达式中都存在  $\Delta t$  项,这一数学项与表达式中的指数项相结合,导致逆高斯和双伽马函数的曲线呈现出先上升再下降的趋势,即曲线会出现类似于山峰样的峰值;而单伽马与 CEAPF 函数中的  $\Delta t$  项可以通过调节  $\alpha$  因子予以消

除,至于双指数函数,则因为其不含  $\Delta t$  项而不存在这一缺陷。结合表 3 的 RMSE 数据可以发现:清澈海洋环境下,双指数函数在所有拟合函数中的误差最小;其次是单伽马函数,而 CEAPF 函数相对要差,但二者的 RMSE 值都远小于 5%。

从图 4 可以发现,在 10 m 的传输距离下,浑浊水质将产生比较严重的散射和吸收,从而导致 CIR 曲线呈现出具有较快上升段和缓慢下降段的脉冲形状。从拟合曲线的直观感受来看,逆高斯函数最差,双伽马函数次之,而原本提出用于拟合清澈海洋水质 CIR 的双指数函数的拟合效果却是最好的。表 3 的 RMSE 数据也给出了类似的佐证。分析可能的原因:逆高斯函数是单函数,无法体现低阶散射和高阶散射的综合影响,且其影响上升段变化的项固定为  $t^{-3/2}$ ,缺乏灵活性;双伽马函数虽然是为拟合浑浊水质的 CIR 而提出的,但原始文献[9]中并未给出双伽马函数与其他函数间类似 RMSE 值的对比,加之其影响曲线上升段变化的项  $\Delta t$  也是固定的,拟合灵活性亦无法保证,其性能比双指数、单伽马和 CEAPF 函数稍差也是可能的。

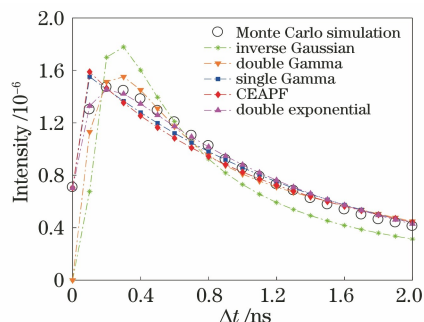


图 4 浑浊海港水质下 Monte Carlo 仿真 CIR 曲线与各拟合函数曲线对比

Fig. 4 Comparison between CIR curve simulated by Monte Carlo and various function fitting curves in harbor water

表 4 不同距离下各拟合函数与 Monte Carlo 仿真的 CIR 间的 RMSE 值

Table 4 RMSE between CIR simulated by Monte Carlo and various function fitting curves for different link ranges

Water type	Link range / m	Inverse Gaussian	Double Gamma	Single Gamma	CEAPF	Doubl exponential
Clear ocean	20	2.0009	2.0003	0.0382	0.0124	0.0156
	50	1.2422	1.2416	0.0825	0.0137	0.0341
Coastal	30	0.0363	0.0343	0.0617	0.0495	0.0551
	40	0.1616	0.0422	0.1000	0.0650	0.0842
Harbor	12	0.1879	0.0592	0.0771	0.0675	0.0216
	16	0.4791	0.1465	0.1167	0.1150	0.0888

需要说明一点,表 4 中不同水质下传输距离设置之所以不同,是考虑到清澈海洋水质的衰减系数

因此,综合各种水质下的拟合效果发现:在衰减长度  $\tau$ <sup>[16]</sup>(定义为衰减系数与传输距离的乘积)较小时(清澈海洋和近海海岸水质  $\tau$  分别为 1.5 和 3.98),双指数函数拟合 CIR 曲线的效果最好,其次分别是单伽马和 CEAPF 函数,而逆高斯和双伽马函数的效果要差一些,尤其在清澈海洋水质中。

表 3 不同水质下各拟合函数与 Monte Carlo 仿真的 CIR 间的 RMSE 值

Table 3 RMSE between CIR simulated by Monte Carlo and various function fitting curves in different water types

Function	Clear ocean	Coastal	Harbor
Inverse Gaussian	2.2090	0.5419	0.1498
Double Gamma	2.2444	0.5453	0.1007
Single Gamma	0.0097	0.0053	0.0453
CEAPF	0.0135	0.0003	0.0548
Double exponential	0.0048	0.0028	0.0255

### 3.3 不同传输距离下拟合函数性能

由于传输距离是衰减长度  $\tau$  的影响因子之一,故传输距离会对 CIR 曲线的形状产生较大影响,因此,在同一海水环境中,比较  $\tau$  值较大时不同传输距离下拟合函数的性能。首先设定海水水质为清澈海洋,视场角为  $180^\circ$ ,传输距离分别为 20 m 和 50 m,根据仿真绘制出不同传输距离下相应的原始 CIR 曲线和各拟合曲线,结果如图 5、6 所示;再设定工作环境为近海海岸,视场角为  $180^\circ$ ,传输距离为 30 m 和 40 m,并绘制出相应的原始 CIR 曲线和各拟合函数曲线,结果如图 7、8 所示;最后则设定海水为浑浊海港水质,视场角为  $180^\circ$ ,传输距离分别为 12 m 和 16 m,同样绘制出相应的 CIR 曲线和各拟合函数曲线,结果如图 9、10 所示;同时,为表述直观,还计算了各拟合函数与 CIR 数值之间的 RMSE,如表 4 所示。

较小,光子发生散射的情况亦较少,故而光子可以传输较长的距离,因此传输距离分别定为 20 m 和

50 m;对于近海海岸水质,衰减系数变大,光子发生散射的情况明显增多,此时光子传输且被成功接收到的距离变短,因此设置了能合理观察到 CIR 曲线的传输距离,即 30 m 和 40 m;至于浑浊海港水质,因衰减系数很大,若设置与清澈海洋或者近海海岸相同的观测距离将无法接收到光子,因此设置传输距离分别为 12 m 和 16 m。

对图 5、图 6 与图 2 进行对比,并结合表 4 的数据可以发现:在清澈海洋水质中,随着传输距离的增加,CIR 单调下降的曲线形状并没有发生明显的变化,变化的只是纵坐标的数量级亦即接收强度。在传输距离逐渐增加的情况下,CEAPF 和双指数函数的拟合效果都很好,二者与原始 CIR 数据基本上都是重合的。从 RMSE 数据来看:CEAPF 要稍稍占优,而 CEAPF 和双指数函数这二者与单伽马函数相比,优越性随着传输距离的增加越来越明显;至于逆高斯和双伽马函数,因无法正确表示 CIR 曲线的特性和趋势,拟合效果依旧不好,且 RMSE 值都远远大于 5%。

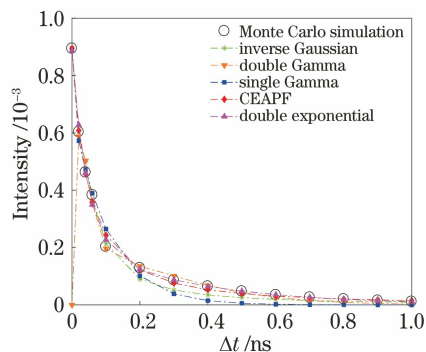


图 5 传输距离 20 m,清澈海洋水质下 Monte Carlo 仿真 CIR 曲线与各拟合函数曲线对比

Fig. 5 Comparison between CIR curve simulated by Monte Carlo and various function fitting curves in clear ocean water for  $L = 20$  m

为进一步分析不同水质下传输距离对不同拟合函数的影响,对图 7、图 8、图 3 及表 4 进行综合分析,可知:当传输距离变长时,在近海海岸水质下,CIR 曲线会出现先上升再下降的波形即尖峰部分。产生尖峰部分的原因是,近海海岸水质的衰减系数决定光子在较长的传输距离下(30~40 m),运动一个步长到达接收机的几率会急剧减小,加之逐渐增强的散射效应,就会出现相对于直达时间  $t_0$  很陡的上升段和较缓的下降段<sup>[5]</sup>,这也是图 7 和图 8 的 CIR 曲线与其他曲线差别较大的原因。单伽马和双指数函数虽然整体上的 RMSE 不错,但函数曲线都

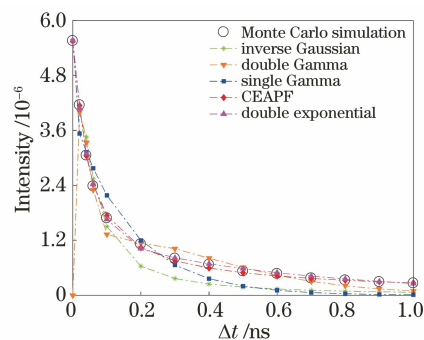


图 6 传输距离 50 m,清澈海洋水质下 Monte Carlo 仿真 CIR 曲线与各拟合函数曲线对比

Fig. 6 Comparison between CIR curve simulated by Monte Carlo and various function fitting curves in clear ocean water for  $L = 50$  m

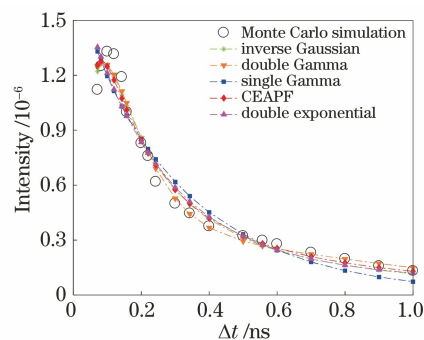


图 7 传输距离 30 m,近海海岸水质下 Monte Carlo 仿真 CIR 曲线与各拟合函数曲线对比

Fig. 7 Comparison between CIR curve simulated by Monte Carlo and various function fitting curves in coastal for  $L = 30$  m

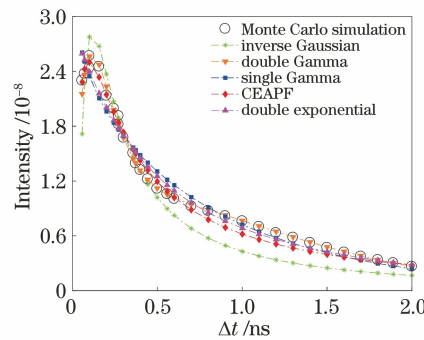


图 8 传输距离 40 m,近海海岸水质下 Monte Carlo 仿真 CIR 曲线与各拟合函数曲线对比

Fig. 8 Comparison between CIR curve simulated by Monte Carlo and various function fitting curves in coastal for  $L = 40$  m

无法体现出 CIR 的尖峰部分,而逆高斯函数虽可以体现尖峰部分,但整体拟合误差较大;反之,双伽马和 CEAPF 函数不仅整体拟合误差比较小,而且也可以体现 CIR 曲线的尖峰变化趋势。

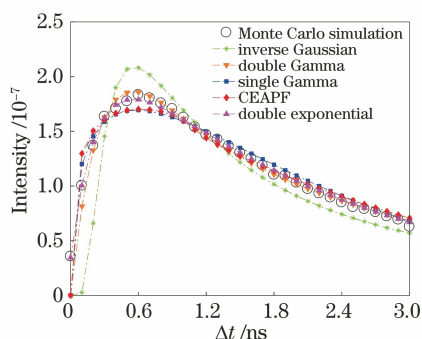


图 9 传输距离 12 m, 浑浊海港水质下 Monte Carlo 仿真 CIR 曲线与各拟合函数曲线对比

Fig. 9 Comparison between CIR curve simulated by Monte Carlo and various function fitting curves in harbor for  $L = 12$  m

至于浑浊海港水质下不同传输距离对拟合函数的影响, 通过对比图 4、图 9、图 10, 并结合表 4 的数据, 可以发现: 随着传输距离的增加, CIR 曲线的时延展宽(定义为 CIR 曲线上接收强度降为峰值强度 1/10 时两个时间点之间的宽度)在不断加大, 此时, 逆高斯函数与 CIR 曲线间的图形差距与 RMSE 越来越大, 拟合效果越来越差; 而单伽马、双指数、双伽马和 CEAPF 函数都能较好地拟合 CIR, 且双指数函数的拟合效果最佳。

通过比较三种水质下多种距离的拟合效果, 可以发现: 双指数函数对具有较尖锐形状的近海海岸水质 CIR 的拟合效果不太理想, 而对像清澈近海海

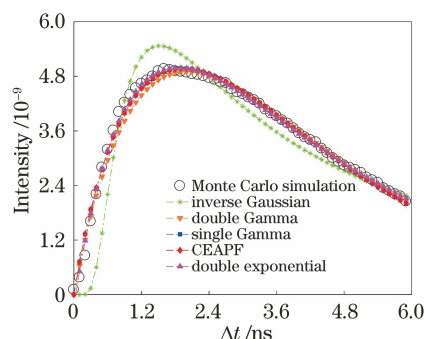


图 10 传输距离 16 m, 浑浊海港水质下 Monte Carlo 仿真 CIR 曲线与各拟合函数曲线对比

Fig. 10 Comparison between CIR curve simulated by Monte Carlo and various function fitting curves in harbor for  $L = 16$  m

岸水质 CIR 走势呈单边指数衰落(也包括  $\tau$  值较小的海岸水质 CIR), 或像浑浊海港具有较平滑缓变山峰状脉冲的 CIR 的拟合效果都非常好; FOV 为  $180^\circ$  时, 在符合 CIR 走势的基础上, 双指数函数在所有拟合函数中的 RMSE 是最小的。

为了令仿真数据更加详实、完善, 考虑不同视场角可能对 CIR 曲线进而对拟合函数的拟合效果产生影响, 额外设置视场角为  $20^\circ$  和  $40^\circ$  的情形, 并在此条件下进行蒙特卡罗仿真来检视各拟合函数的拟合效果。在不同视场角情况下, 不同水质及不同距离时各拟合函数与 CIR 数值之间的拟合 RMSE 数据如表 5 所示。

表 5 不同 FOV 下各拟合函数与 Monte Carlo 仿真 CIR 间 RMSE 值比较

Table 5 Comparison of RMSE between CIR curve simulated by Monte Carlo and function fitting curves for different FOVs

Water type	Link range /m	Inverse Gaussian	Double Gamma	Single Gamma	CEAPF	Double exponential
Clear ocean FOV is $20^\circ$	10	2.2065	2.2380	0.0063	0.0128	0.0019
	20	1.9960	1.9953	0.0324	0.0125	0.0127
	50	1.2511	1.2508	0.0800	0.0154	0.0332
Coastal FOV is $20^\circ$	10	0.6374	0.6380	0.0026	0.0003	0.0009
	30	0.0650	0.0749	0.0817	0.0569	0.1424
	40	0.0687	0.0527	0.1028	0.0623	0.0758
Harbor FOV is $20^\circ$	10	0.1072	0.0937	0.0410	0.0681	0.0229
	12	0.1250	0.0562	0.1129	0.0649	0.0238
	16	0.2401	0.1689	0.1964	0.1747	0.1725
Clear ocean FOV is $40^\circ$	10	2.2107	2.2436	0.0089	0.0202	0.0039
	20	1.9999	1.9993	0.0363	0.0112	0.0164
	50	1.2544	1.2537	0.0882	0.0180	0.0333
Coastal FOV is $40^\circ$	10	0.6402	0.6409	0.0048	0.0002	0.0022
	30	0.0491	0.0640	0.0870	0.0509	0.1069
	40	0.0833	0.0419	0.0888	0.0653	0.0796
Harbor FOV is $40^\circ$	10	0.1386	0.0979	0.0466	0.0651	0.0175
	12	0.1730	0.0572	0.0677	0.0909	0.0178
	16	0.4142	0.1329	0.1319	0.1354	0.1154



### 3.4 分析与总结

总体而言,各拟合函数对 CIR 曲线的拟合效果和海水水质有着非常密切的关系。单伽马函数可以较好地拟合清澈海洋和浑浊海港两种水质下的 CIR 曲线,但在近海海岸水质下,虽然曲线整体拟合效果尚可,但无法拟合出 CIR 曲线的尖峰部分;逆高斯函数则无法拟合清澈海洋水质下 CIR 曲线的单调下降趋势,同时,在近海海岸与浑浊海港水质下,亦与 CIR 曲线间存在很大差异,因此不适合用于拟合 UWOC 系统中的 CIR 曲线;双伽马函数可以较好地拟合带有尖峰部分的 CIR 曲线,即近海海岸和浑浊海港两种水质的 CIR 曲线,但完全无法拟合清澈海洋水质下的 CIR 曲线;CEAPF 函数不仅可以拟合带有尖峰部分的 CIR 曲线,也可以拟合具有指数衰减趋势的 CIR 曲线,即清澈海洋水质下的 CIR 曲线;双指数函数不仅在清澈海洋水质的 CIR 曲线拟合中可以取得优于( $L \leq 10$  m)或者相当于( $L > 10$  m)CEAPF 函数的拟合效果,也能在浑浊海港水质下获得极佳的拟合性能。在近海海岸水质下,当衰减长度  $\tau$  较小亦即距离较短而令 CIR 曲线呈现单调下降规律时,双指数函数亦能拟合 CIR 曲线;而当衰减长度  $\tau$  较大亦即距离变长从而导致 CIR 曲线出现比较尖锐的尖峰时,虽然与双指数和 CEAPF 函数相比,双指数函数拟合误差 RMSE 差距不大,但从图上看却未能表征出此时 CIR 曲线的尖峰特性。因双指数函数无法拟合 CIR 曲线头部尖峰而可能对系统性能,如系统误码率等产生的影响,还有待后续通过数值仿真加以对比研究。

## 4 结 论

针对现有 UWOC 系统在清澈海洋环境下尚未有确定性函数以拟合其 CIR 仿真数据的不足,提出了一种采用双指数函数以拟合 CIR 曲线的方法,并通过理论分析与数值仿真,对双指数函数与国内外学者提出的其他诸如单伽马、逆高斯、双伽马、CEAPF 函数进行对比,以揭示双指数函数的优越性。同时,在不同海洋水质、传输距离、视场角条件下,分别采用拟合曲线比较与拟合误差 RMSE 数值对比两种方式,研究 5 种拟合函数的不同拟合效果,总结、分析了它们各自的适用范围。本研究成果可以为今后选取合适的 CIR 拟合函数以进一步分析 UWOC 系统的理论性能奠定基础。

## 参 考 文 献

- [1] Spagnolo G S, Cozzella L, Leccese F, et al. Underwater optical wireless communications: overview[J]. *Sensors*, 2020, 20(8): 2261-2275.
- [2] Ali M F, Jayakody D N K, Chursin Y A, et al. Recent advances and future directions on underwater wireless communications [J]. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 2020, 27(5): 1379-1412.
- [3] Cox W. Simulation, modeling, and design of underwater optical communication systems [D]. Raleigh: North Carolina State University, 2012: 19-34.
- [4] Leathers R A, Downes T V, Davis C O, et al. Monte Carlo radiative transfer simulations for ocean optics: a practical guide [R]. Kingman: Defense Technical Information Center, 2004.
- [5] Gabriel C, Khalighi M A, Bourennane S, et al. Monte-Carlo-based channel characterization for underwater optical communication systems [J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2013, 5(1): 1-12.
- [6] Cox W, Muth J. Simulating channel losses in an underwater optical communication system [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2014, 31(5): 920-934.
- [7] Ding H P, Chen G, Majumdar A K, et al. Modeling of non-line-of-sight ultraviolet scattering channels for communication[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2009, 27(9): 1535-1544.
- [8] Wei W, Zhang X H, Rao J H, et al. Time domain dispersion of underwater optical wireless communication[J]. *Chinese Optics Letters*, 2011, 9(3): 030101.
- [9] Tang S J, Dong Y H, Zhang X D, et al. Impulse response modeling for underwater wireless optical communication links [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2014, 62(1): 226-234.
- [10] Li Y M, Leeson M S, Li X F, et al. Impulse response modeling for underwater optical wireless channels[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(17): 4815-4823.
- [11] Song P, Liu C, Zhu L, et al. Analysis of single-scatter path loss in wireless ultraviolet communication in mobile scene[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(4): 0406001.  
宋鹏, 刘春, 朱磊, 等. 移动场景下无线紫外光通信单次散射路径损耗分析[J]. *光学学报*, 2020, 40(4): 0406001.
- [12] Cao Y, Li Y, Li X H, et al. Research on construction method of polarization code in wireless

- optical communication[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(21): 2106003.
- 曹阳, 李岳, 李小红, 等. 无线光通信中极化码构造方法研究[J]. *光学学报*, 2020, 40(21): 2106003.
- [13] Liu Q Q. Linear Bayes estimator for the parameters of the inverse Gaussian distribution [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017: 5-8.
- 刘强. 逆高斯分布参数的线性贝叶斯估计[D]. 北京: 北京交通大学, 2017: 5-8.
- [14] Mooradian G C, Geller M. Temporal and angular spreading of blue-green pulses in clouds[J]. *Applied Optics*, 1982, 21(9): 1572-1577.
- [15] Mobley C D. Light and water: radiative transfer in natural waters [EB/OL]. [2020-11-18]. [https://www.researchgate.net/publication/234014400\\_Light\\_and\\_Water\\_Radiative\\_Transfer\\_in\\_Natural\\_Waters](https://www.researchgate.net/publication/234014400_Light_and_Water_Radiative_Transfer_in_Natural_Waters).
- [16] Petzold T J. Volume scattering functions for selected ocean waters [R]. Kingman: Defense Technical Information Center, 1972.
- [17] 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.