

激光与光电子学进展

散射相函数对水下无线光通信系统检测性能的影响

刘陕陕, 李岳衡*, 黄平, 谭跃跃, 居美艳

河海大学计算机与信息学院, 江苏 南京 211100

摘要 为了验证海洋光学界采用的散射相函数在水下无线光通信(UWOC)系统关键性能指标仿真中的准确性,基于 Monte Carlo 方法,通过仿真研究了 5 种近似相函数在 3 种典型水质中对 UWOC 系统接收机误比特率(BER)的影响,以期获得不同水质条件下适合于 UWOC 系统信道仿真和系统性能检测的相函数模型。研究表明:Sahu-Shanmugam(SS)和 Fournier-Forland(FF)相函数对 BER 仿真的影响最小;Henyey-Greenstein(HG)和 Two-Term Henyey-Greenstein(TTHG)相函数对 BER 仿真影响则和水质有关;而 Haltrin 相函数的 BER 仿真偏差最大。

关键词 散射; 水下无线光通信; 散射相函数; 信道冲激响应; 误比特率; Monte Carlo 仿真

中图分类号 TN929.3

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.2129001

Influence of Scattering Phase Function on Detection Performance of Underwater Wireless Optical Communication System

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

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

Abstract In order to verify the accuracy of scattering phase function used in ocean optics in the simulation of key performance indexes of underwater wireless optical communication (UWOC) system, based on Monte Carlo method, the influence of five approximate phase functions on receiver bit error rate (BER) of UWOC system is studied by simulations in order to obtain the phase function model suitable for channel simulation and system performance detection under different water quality conditions. The results show that the Sahu-Shanmugam (SS) and Fournier-Forland (FF) functions have the least influence on BER simulation; the influence of Henyey-Greenstein (HG) and Two-Term Henyey-Greenstein (TTHG) on BER simulation is closely related to water types; and the BER simulation deviation caused by Haltrin function is the largest.

Key words scattering; underwater wireless optical communication; scattering phase function; channel impulse response; bit error rate; Monte Carlo simulation

OCIS codes 290.5825; 290.5850; 300.1030

1 引言

水下无线光通信(UWOC)具有信息传输速率

高、延迟低、保密性强等优点^[1-2],但特殊的通信环境和相较于陆上无线通信略显薄弱的研究基础,使得其要实现大规模的商业或工业应用还有许多路要

收稿日期: 2021-02-08; 修回日期: 2021-02-27; 录用日期: 2021-03-08

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

通信作者: *yueheng_li@hhu.edu.cn

走。而在众多亟待解决的科学问题中,海洋环境下无线光通信信道的模拟就是一个比较重要和迫切的技术点。

对于海洋环境水下无线光信道的模拟,常采用基于计算机仿真的 Monte Carlo 法来建模 UWOC 系统的信道传输特性。选取合适的散射相函数来计算光子与水中粒子发生碰撞时,运动轨迹发生变化之后的俯仰散射角是该方法的一个重要环节^[3],将在很大程度上决定仿真过程中光子的运动轨迹及最后到达接收机的时间,从而影响 UWOC 系统的信道冲激响应(CIR)。获取海洋水质中散射相函数的最准确方法,是美国学者 Mobley^[4]基于 Petzold^[5]实测的体散射函数数据提出的平均粒子相函数(PPF)。不过,由于实测的 PPF 只有 55 组数据,无法提供 0°~180°范围内的细致角度值;且 PPF 没有精确的闭型函数表达式,故而不方便在 Monte Carlo 仿真过程中根据生成的随机数反解光子与水中粒子碰撞后的散射角。于是后续学者陆续提出了各种具有闭型表达式的相函数来代替真实 PPF。

在传统自由空间光通信系统中,研究者们普遍采用简单的 Henyey-Greenstein(HG)相函数来表征光子与大气粒子碰撞后的散射角变化,通过相函数来反映光的散射信息^[6]。因此在 1994 年, Mobley^[4]首次将 HG 相函数直接移植到 UWOC 系统中作为 PPF 实测数据的粗略近似。同年, Fournier 等^[7]基于海水中粒子尺寸服从逆幂率分布的假设,推导出了一个具有解析形式的相函数 Fournier-Forand(FF)相函数。随后在 1999 年, Fournier 等^[8]又给出了 FF 相函数的最终表达。2013 年, Gabriel 等^[9]则采用改进的 Two-Term Henyey-Greenstein(TTHG)模型来作为散射相函数研究水下光通信信道的 CIR,并据此分析不同水质、发射功率、接收机配置下的误码率性能。Cox^[10]于其博士论文提供的仿真程序包^[11]中采用 Haltrin 提出的另一种回归散射相函数来开展有关 UWOC 系统 Monte Carlo 信道特性及各项性能参数影响的比较仿真。文献^[12]则从函数图形和不同角度范围内的拟合均方根(RMS)误差这两个层面分析了 5 种近似相函数与 PPF 之间的差异,但没有给出 CIR 方面的仿真与分析。2015 年,印度学者 Sahu 等^[13-14]根据 Mie 散射近似理论提出了一种可以更加精确地拟合 PPF 测试数据的 Sahu-Shanmugam(SS)相函数模型,并在文献^[15]中比较了该函数与 HG、TTHG 及 PPF 的 RMS 和 CIR 性能

差异。2019 年, Umar 等^[16-17]在非视距工作环境下,比较了 UWOC 系统分别采用 HG、TTHG 和 FF 相函数获得的 CIR 的曲线差异,并探讨了双伽马函数和加权双伽马函数拟合 CIR 仿真曲线时的误差;随后在此模型基础上,又探究了不同的信道调制方案、接收机视场角(FOV)和接收机带宽对系统性能的影响。

从上述有关散射相函数方面的研究不难看出,国内外学者的工作要么局限于 CIR 数据的表象,要么局限于各种相函数间的简单近似比较,或者仅仅采用某确定相函数作为仿真手段研究不同系统参数配置下的 UWOC 性能,忽略了采用 Monte Carlo 仿真获取信道 CIR 的真实目的,即为了模拟 UWOC 系统接收机的误比特率(BER)等关键性能指标这一大方向^[18-19],故而应该在这些性能指标下对不同相函数与 PPF 测试数据的拟合误差进行对比。本文创新性地提出以系统 BER 为衡量指标,通过仿真研究了不同海洋水质环境中真正适合 UWOC 系统 Monte Carlo 误码性能模拟的散射相函数。

2 海洋光学特性的模拟

2.1 水下信道的光学特性

在 UWOC 系统中,光子在海水中传播时,由于会与水中溶解或悬浮的粒子发生碰撞而发生吸收和散射现象。吸收使光子能量损耗,散射令光子的传播方向发生偏移;总之,吸收和散射均导致光在海水中的传输发生了衰减。一般用衰减系数 $c(\lambda)$ ^[4]来衡量光的衰减程度,表达式为

$$c(\lambda) = a(\lambda) + b(\lambda), \quad (1)$$

式中: λ 是可见光的波长,由于海水在蓝绿光波段的吸收系数最小,结合水下光学界的研究惯例,不失一般性,取 $\lambda = 532 \text{ nm}$; $a(\lambda)$ 和 $b(\lambda)$ 分别是吸收系数和散射系数,显然它们是 λ 的函数。由于波长固定,为符号书写简洁,后文描述中省略了变量 λ 。需要注意的是,不同的水质对应着不同的吸收系数和散射系数,3 种常见海水水质的 a 、 b 、 c 参数如表 1 所示^[9,20]。

表 1 不同水质的衰减参数

Type of water	a	b	c
Clear water	0.069	0.080	0.150
Coastal water	0.179	0.219	0.398
Harbor water	0.366	1.824	2.190

光子在海水中传播时的吸收过程表现为能量的衰减,仿真模拟时可用散射反照比 $\omega_0 = b/c$ 来更新光子的权重^[9]。而光子在海水散射过程中俯仰角(又称极角、经度角) θ_s 的变化则可以通过散射相函数 $\beta(\theta)$ 构成的方程来反解计算,方位角(又称径向角) ϕ_s 则由 $[0, 2\pi]$ 范围内的随机数生成^[3],表达式为

$$\begin{cases} \epsilon_\theta = 2\pi \int_0^{\theta_s} \beta(\theta) \sin \theta d\theta, \\ \phi_s = 2\pi \epsilon_s, \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\beta(\theta)$ 为要考查的各种散射相函数,满足立体角归一化条件 $2\pi \int_0^\pi \beta(\theta) \sin \theta d\theta = 1$; ϵ_θ 和 ϵ_s 皆为 $[0, 1]$ 之间均匀分布的随机变量。鉴于光子在海水中的每一次随机碰撞都会改变散射角 (θ_s, ϕ_s) , 从而影响运行轨迹和到达接收机的时间,进而产生不同水质、不同收发参数条件下的 CIR。由(2)式可以清晰地看出,散射相函数 $\beta(\theta)$ 将对 UWOC 系统的 CIR 等性能的模拟产生重大影响。图 1 绘出了光子与水中粒子发生碰撞散射时,俯仰角-方位角变化过程,具体原理限于篇幅在此不再赘述,读者可以通过参考文献[3, 10]了解细节。

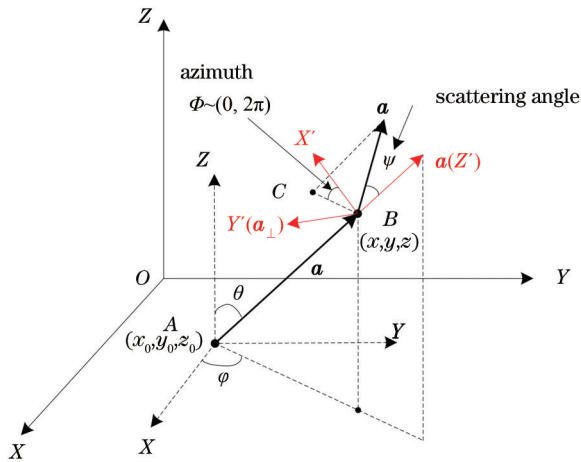


图 1 光子发生碰撞后散射俯仰角-方位角变化示意图
Fig. 1 Schematic diagram of change of pitch-azimuth angle after scattering

2.2 散射相函数实测数据及几种近似表达

2.2.1 PPF

PPF 是由实测数据计算得到的相函数。1972 年, Petzold^[5] 测量了巴哈马群岛舌海的清澈海洋、南加州沿岸的近海海岸和圣迭戈港的浑浊海港在不同经纬度及深度的体散射函数数据。后来 Mobley 将这些数据加以抽样整合计算, 得到了 3 种水质的微粒散射相函数, 再通过取平均值得到

PPF^[4]。PPF 是通过实际测量数据获得的, 可以代表大部分海洋水样的实际散射状况, 具有非常高的参考价值, 因此 PPF 被海洋光学界公认为其他近似散射相函数准确度的评判标准。

2.2.2 HG 相函数

HG 相函数之所以得到光学界的广泛应用, 是因为有比较简单的数学表达式和解析形式的反函数^[3-4], 表达式为

$$P_{HG}(\theta, g) = \frac{1 - g^2}{4\pi(1 + g^2 - 2g \cos \theta)^{3/2}}, \quad (3)$$

式中: g 代表非对称因子, 表示的是前向散射和后向散射的大小。 $g = 0$, 代表光在各向均匀的介质中发生散射; $g > 0$, 代表光更倾向于前向散射; $g < 0$, 代表光更倾向于后向散射。 g 的大小等于散射角 θ 的平均余弦值^[4]。不过在实际比较仿真中, 为了和实测 PPF 数据尽可能吻合, Mobley^[12] 采用 HG 相函数的后向散射概率积分值 0.0183 来反解 g , HG 的后向散射积分为

$$B_{P_{HG}} = 2\pi \int_{\pi/2}^\pi P_{HG}(\theta, g) \sin \theta d\theta = \frac{1 - g}{2g} \left(\frac{1 + g}{\sqrt{1 + g^2}} - 1 \right). \quad (4)$$

由(4)式可求得对应的 $g = 0.9185$ 。由于 HG 相函数的表达式较为简单, 可以直接反解出对应随机变量 ϵ_θ 的散射极角:

$$\theta_s = \arccos \left\{ \frac{1 + g^2 - [(1 - g^2)/(1 + g - 2g\epsilon_\theta)]^2}{2g} \right\}. \quad (5)$$

需要指出的是, HG 相函数在散射角小于 20° 和大于 130° 时的函数值与实际 PPF 测试值之间有很大的偏差。但即便如此, Gabriel 等^[9] 和 Huang 等^[21] 仍然采用 HG 相函数来仿真 UWOC 系统的 CIR 等特性。

2.2.3 TTHG 相函数

为了克服 HG 相函数在大、小角度两端与 PPF 测试数据间的偏差问题, 美国学者 Haltrin^[22] 提出了一种双项 HG 函数的改进形式, 即著名的 TTHG 散射相函数。TTHG 是一种加权形式的散射相函数, 表达式为

$$P_{TTHG}(\alpha, \theta, g_1, g_2) = \alpha P_{HG}(\theta, g_1) + (1 - \alpha) P_{HG}(\theta, -g_2), \quad (6)$$

式中: g_1 和 g_2 分别为前向散射系数和后向散射系数, 分别代表前向散射和后向散射所占的比例; α 是加权系数, 取值范围在 $[0, 1]$ 之间, 它决定了前、后两个 HG 函数在 TTHG 函数中的占比。(6) 式中的

各个系数表达式为

$$\overline{\cos \theta} = 2(1 - 2B)/(2 + B) = \alpha(g_1 + g_2) - g_2, \quad (7)$$

$$\alpha = \frac{g_2(1 + g_2)}{(g_1 + g_2)(1 + g_2 - g_1)}, \quad (8)$$

$$g_2 = -0.3061446 + 1.000568g_1 - 0.01826332g_1 + 0.03643748g_1^3 \quad (0.30664 < g_1 \leq 1), \quad (9)$$

式中: B 代表后向散射概率; $\overline{\cos \theta}$ 代表散射极角的平均余弦值。将 $B = 0.0183$ 代入(7)式,再联立(8)式和(9)式即可求得 TTHG 相函数的前向反射系数 $g_1 = 0.9809$, 后向反射系数 $g_2 = 0.6922$, 加权系数 $\alpha = 0.9843$ 。在获得了 TTHG 相函数的各项系数之后,不难求得累积相函数积分值为

$$2\pi \int_0^{\theta_s} P_{\text{TTHG}}(\theta) \sin \theta d\theta = \alpha \cdot \frac{1 - g_1^2}{2g_1} \left(\frac{1}{1 - g_1} - \frac{1}{\sqrt{1 + g_1^2 - 2g_1\mu_s}} \right) - (1 - \alpha) \cdot \frac{1 - g_2^2}{2g_2} \left(\frac{1}{1 + g_2} - \frac{1}{\sqrt{1 + g_2^2 + 2g_2\mu_s}} \right) = \epsilon_\theta, \quad (10)$$

式中: $\mu_s = \cos \theta_s$ 。针对 TTHG 相函数,给定随机变量 ϵ_θ ,无法由(10)式获得散射极角 θ_s 的解析反函数,但可以采用诸如 Matlab 软件中的单变量非线性求根函数获得其数值近似解。Gabriel 等^[9]主要采用 TTHG 相函数来仿真 UWOC 系统的各项信道特性。

2.2.4 FF 相函数

1994 年,加拿大学者 Fournier 等^[7]基于海水中粒子尺寸服从逆幂率分布的假设,采用不规则衍射近似的一种修正形式推导出了一个具有解析形式的相函数,后人遂将其命名为 FF 相函数。FF 相函数最新形式的表达式^[8]为

$$P_{\text{FF}}(\theta) = \frac{1}{4\pi(1 - \delta)^2 \delta^v} \left\{ v(1 - \sigma) - (1 - \sigma^v) + \frac{4}{u^2} [\delta(1 - \sigma^v) - v(1 - \delta)] \right\}, \quad (11)$$

$$\begin{cases} v = (3 - \mu)/2 \\ \delta = u^2 / [3(n - 1)^2], \\ u = 2\sin(\theta/2) \end{cases} \quad (12)$$

式中: n 代表海水中粒子的实际折射率; μ 表示逆幂率分布的斜率参数; u, v, δ 是为了简化公式的表示

所引入的参变量。文献[11]推导出了 FF 相函数的后向散射概率,表达式为

$$B_{P_{\text{FF}}} = 2\pi \int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} P_{\text{FF}}(\theta, g) \sin \theta d\theta = 1 - \frac{1 - \delta_{90^\circ}^{v+1} - 0.5(1 - \delta_{90^\circ}^v)}{(1 - \delta_{90^\circ}^v) \delta_{90^\circ}^v}, \quad (13)$$

式中, δ_{90° 是 $\theta = 90^\circ$ 时的 δ 值。由(12)、(13)式,不难得到

$$\mu = \frac{2\lg [2B_{P_{\text{FF}}}(\delta_{90^\circ} - 1) + 1]}{\lg \delta_{90^\circ}} + 3. \quad (14)$$

以 PPF 的后向散射概率 0.0183 为参照,可以得到 FF 相函数的对应参数值 $n = 1.1, \mu = 3.5835$ 。

需要强调一点的是,从 FF 相函数开始,包括下面的 Haltrin 回归相函数、SS 相函数,由于函数表达式非常复杂,已无法获得类似(10)式那样的含散射极角的方程,因而在后续性能仿真中,将预先计算好对应小步长 ϵ_θ 的 θ_s 值,如此就可以通过查表的方式快速获得粒子碰撞的散射极角。

2.2.5 Haltrin 回归相函数

由于 Petzold^[5]当年测量的清澈海洋、近海海岸、浑浊海港 3 种水质下的 15 组散射相函数数据中每组都只有 55 个离散的实验点值,因此在实际使用过程中需要对其进行适当的插值运算以获得除测试角之外的其他补充数据。为此, Haltrin 利用统计回归理论对 Petzold 实测的 15 组不同水质的测试数据加以处理,从而获得适用于这 15 组数据的通用相函数^[23]。Haltrin 相函数表达式为

$$P_{\text{HR}} = \frac{1}{b} \exp \left\{ q \left[\sum_{m=1}^5 (-1)^m k_m \theta^{\frac{m}{2}} \right] \right\}, \quad (15)$$

$$\begin{cases} q=2.598+17.748\sqrt{b}-16.722b+5.932b\sqrt{b} \\ k_1=1.188-0.688\omega_0 \\ k_2=0.1(3.07-1.90\omega_0) \\ k_3=0.01(4.58-3.20\omega_0) \\ k_4=0.001(3.24-2.25\omega_0) \\ k_5=0.0001(0.84-0.61\omega_0) \end{cases} \quad (16)$$

需要特别注意的是, Haltrin 给出的(15)式中散射极角 θ 的计算量纲为“°”, 而将该式代入(2)式进行积分计算反解极角时, θ 的量纲又为“rad”, 故而在积分中需要对(15)式的变量进行适当的转换。由(15)式可知, Haltrin 回归相函数模型与水质类型有

$$\ln P_{ss}(\theta) = \begin{cases} P_1(\ln \theta)^2 + P_2(\ln \theta) + P_3, & 0.1^\circ \leq \theta \leq 5^\circ \\ P_1(\ln \theta)^3 + P_2(\ln \theta)^2 + P_3 \ln \theta + P_4, & 5^\circ < \theta \leq 90^\circ \end{cases} \quad (17)$$

式中: 角度 θ 的计算单位为°。系数可以表示为

$$P_m = a_m e^{-x} + b_m \cdot x + c_m, \quad (18)$$

$$\begin{cases} a_m = \frac{d_m}{y^2} + e_m \sin(4\pi y) + f_m \cdot y + g_m \\ b_m = \frac{h_m}{y^2} + i_m \sin(4\pi y) + j_m \cdot y + k_m, \\ c_m = \frac{l_m}{y^2} + o_m \sin(4\pi y) + p_m \cdot y + q_m \end{cases} \quad (19)$$

式中: $x = \xi - 3, y = n - 1$, 其中 ξ 为粒子尺寸分布的斜率。结合后向散射概率为 0.0183 的要求, 通过计算给出了 $n = 1.16, \xi = 3.4319$ 的优化组合^[15]。 m 的取值根据角度范围的不同而有所变化: 当 $0.1^\circ \leq \theta \leq 5^\circ$ 时, m 的取值是 1, 2, 3; 而当 $5^\circ < \theta \leq 90^\circ$ 时, m 的值为 1, 2, 3, 4。拟合公式中用到的诸如 $a_m \sim q_m$ 的各个系数是通过 PPF 数据进行仿真拟合回归分析得到的。

原始提出 SS 散射相函数的文献^[13-14]并没有给出散射角大于 90° 的拟合表达; 随后, 文献^[15]采用后向平坦散射相函数的假设将其定义为常数 $0.0183/2\pi = 0.002913 \text{ s} \cdot \text{r}^{-1}$ 。这种简略处理方法在 Haltrin^[23] 的论文中首先被提出, 理论依据是后向散射概率在整个全角度散射中的占比很小, 从下面的仿真结果比较来看, 也验证了该处理方式的可行性。

为了清晰地展示 6 种相函数之间的差异, 本实验组给出了这些相函数值随角度变化的半对数及

关, 结合前述 PPF 后向散射概率为 0.0183 的约束条件, 在后文的仿真中统一选择 Petzold 实测的浑浊海港第 6 组数据值来作为拟合目标数值, 以生成最终确定的相函数, 此时 $b = 1.583, \omega_0 = 0.824$, 所对应的后向散射概率 $B = 0.019$ 。

2.2.6 SS 相函数

印度学者 Sahu 等^[15] 根据 Mie 散射的精确数值解提出了一种半解析形式的散射相函数模型以拟合 PPF 的前向散射角, 并将其命名为 SS 相函数模型。当散射角位于 $0^\circ \sim 90^\circ$ 前向散射区间内时, SS 相函数可以非常精确地逼近 PPF 测试数据。SS 相函数是以分段函数形式给出的, 表达式为

全对数对比曲线, 如图 2 和图 3 所示。由图中仿真曲线可以非常明显地观察到, SS、FF、Haltrin 相函数图形在全角度范围内与测试数据 PPF 的走势比较近似; 而 HG、TTHG 这两种相函数的数值则与 PPF 值差距比较大, 尤其是在小角度范围 ($\theta \leq 5^\circ$) 差距明显。

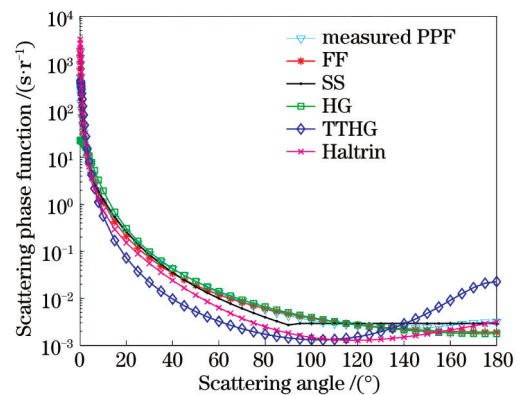


图 2 六种相函数随散射角变化半对数曲线图
Fig. 2 Semi-logarithmic curves of six phase functions with scattering angle variation

为进一步给出各种相函数之间更为直观、准确的量化差异, 定义了两个相函数之间的均方根百分比误差^[12]。如此, 则可以使用 PPF 做为衡量相函数准确性的标准, 分别计算其他相函数与 PPF 之间的近似误差程度。均方根百分比误差表达式为

$$\Delta P_1 = \frac{100}{N_2 - N_1} \left\{ \sum_{i=N_1}^{i=N_2} \left[\frac{P(\theta) - P_{PPF}(\theta)}{[P(\theta) + P_{PPF}(\theta)]/2} \right]^2 \right\}^{0.5} \begin{vmatrix} \theta_2 \\ \theta_1 \end{vmatrix} \quad (20)$$

$$\Delta P_2 = \frac{100}{N_2 - N_1} \left\{ \sum_{i=N_1}^{i=N_2} \left[\frac{P(\theta) - P_{PPF}(\theta)}{[P(\theta) + P_{PPF}(\theta)]/2} \right]^2 \sin \theta \right\}^{0.5} \left| \begin{matrix} \theta_2 \\ \theta_1 \end{matrix} \right., \quad (21)$$

式中： θ_1 和 θ_2 代表求均方根误差的散射角范围； N_1 和 N_2 分别为散射角度范围内所对应的样本点的标号； $P(\theta)$ 指的是待考查的相函数表达式； $P_{PPF}(\theta)$ 为目标 PPF 测试数据值。需注意的是：两个表达式中除是否含有 $\sin \theta$ 因子之外，其他计算量是完全一样的，含 $\sin \theta$ 因子是为了综合考虑相函数在计算散射系数时的误差，而不含 $\sin \theta$ 仅是考查两个相函数之间的误差；此外，两个相函数差值以它们的平均值进行归一化，是为了消除在小角度时相函数值差异过大对整体误差的影响^[12]。

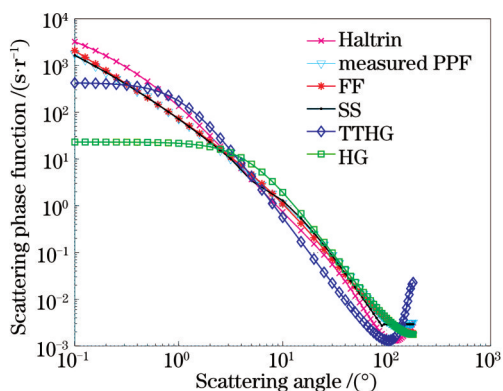


图 3 六种相函数随散射角变化全对数曲线图

Fig. 3 Total logarithmic curves of six phase functions with scattering angle variation

为方便读者观察，将 HG 等其他 5 个相函数与 PPF 在各个角度区间的均方根百分比误差统计表用于对比分析，如表 2 和表 3 所示。

从表 2 和表 3 的数据可以看出，当不考虑 $\sin \theta$ 因子时，所有的角度范围内，FF 相函数和 SS 相函数的拟合程度最好，而在小角度 $0^\circ \sim 5^\circ$ 时，SS 相函数与 PPF 的相近程度远远超过了其他相函数。而当考虑 $\sin \theta$ 因子时，HG 相函数的拟合性能有了很大提升，在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 和 $5^\circ \sim 90^\circ$ 时，拟合性能甚至优于 FF 相函数和 SS 相函数。但总体来讲，FF 相函数和 SS 相函数的拟合程度最好；而 TTHG 相函数和 Haltrin 相函数与 PPF 的差距则比较大。

3 散射相函数对系统性能仿真的影响

第 2 节介绍了海洋光学界开展 UWOC 系统 Monte Carlo 性能仿真时常用的几种相函数，并比较了它们随散射角变化的规律以及不同散射角范围与标准 PPF 的拟合近似误差。本节基于文献[9-10]介绍的 Monte Carlo 建模仿真方法，在清澈海洋、近海海岸、浑浊海港 3 种典型海水水质下，从系统 BER 的全新角度开展关于 HG、TTHG、FF、Haltrin、SS 五种散射相函数对系统性能影响的仿真

表 2 各相函数与 PPF 均方根百分比误差(无 $\sin \theta$ 因子)

Table 2 Percentage error of root mean square of each phase function and PPF (without factor $\sin \theta$)

Scattering angle range / (°)	FF	TTHG	HG	Haltrin	SS
0-5	0.1678	1.3936	2.6016	0.9942	0.0084
0-90	0.1198	0.7889	0.4835	0.5487	0.3638
0-180	0.5487	0.6254	0.2755	0.3783	0.2602
5-90	0.1414	0.9125	0.1385	0.6328	0.4043
5-180	0.1178	0.6754	0.1335	0.4048	0.2741
90-180	0.1846	0.9876	0.2219	0.5157	0.1517

表 3 各相函数与 PPF 均方根百分比误差(有 $\sin \theta$ 因子)

Table 3 Percentage error of root mean square of each phase function and PPF (with factor $\sin \theta$)

Scattering angle range / (°)	FF	TTHG	HG	Haltrin	SS
0-5	0.0038	0.0242	0.0296	0.0129	0.000012
0-90	0.0670	0.5601	0.0516	0.4202	0.2983
0-180	0.0443	0.4213	0.0448	0.3064	0.1981
5-90	0.0818	0.6835	0.0627	0.5128	0.3322
5-180	0.0490	0.4656	0.0495	0.3386	0.2090
90-180	0.0566	0.6355	0.0754	0.4476	0.0932

研究,并与作为基准的实测 PPF 数据的仿真结果作对比,从而得到了不同环境中进行 UWOC 系统性能评估使用的散射相函数。

3.1 信道冲激响应曲线的获取与比较

为了研究 UWOC 水下光学信道的系统 BER,首先需要获得信道的 CIR 数据。通过 Monte Carlo 方法获取 CIR 的基本原理是:光源发射出足够数量

的光子,记录并判断经多次碰撞吸收与散射后成功到达接收机孔径的所有光子的运动路径和接收权重,按一定的接收时序进行统计即可获得随接收时间变化的接收强度分布。使用 Monte Carlo 方法仿真 CIR 以及进行 BER 模拟计算的具体步骤流程如图 4 所示,其中 T_t 为阈值,读者可以参考文献[10]了解具体细节。

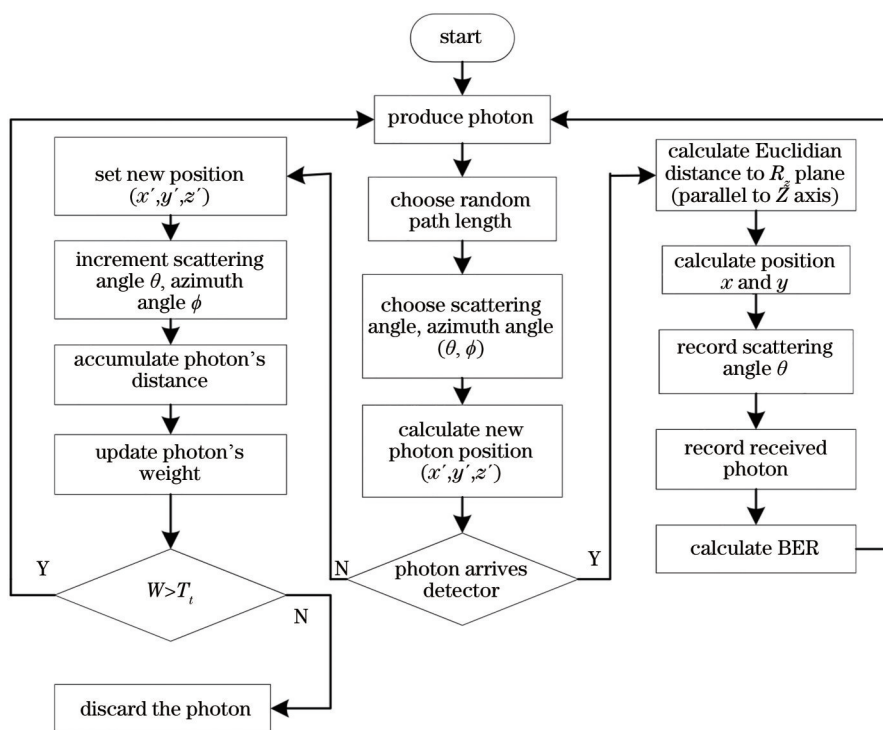


图 4 Monte Carlo 仿真流程图

Fig. 4 Flow chart of Monte Carlo simulation

通过 Monte Carlo 仿真得到的 CIR 数据和信源信号传输速率,便可以判断该信道的符号间干扰 (ISI) 的强弱,从而决定接收机采取接收算法或策略。由于散射相函数决定了仿真中光子与水中粒子碰撞后散射极角 θ 的大小,散射相函数会对系统最终的 CIR 仿真结果产生极为重要的影响。

参考文献[10-11,22],不失一般性,CIR 仿真的参数设定如下:采用光强服从高斯分布的激光源,波束宽度为 3 mm,光束发散角为 10° ,光波长为 532 nm,接收机孔径直径为 50 cm,光子存活门限设为 10^{-4} ,发送光子数为 10^9 ,单个光子的初始权重为 1,FOV 设定为 180° ;不同水质的传输距离不同,清澈海洋、近海海岸、浑浊海港的传输距离分别为 50、40、10 m。图 5~7 即为对应水质下,采用不同相函数时的系统 CIR Monte Carlo 仿真数据,图中的横坐标代表光子到达接收机的相对传输时间,单位为

ns;纵坐标代表归一化接收光强,用接收到的光子权重之和除以发送的总光子数目来表示。

从图 5~7 可以看出,当水质变得越来越混浊时,光子在水中因会与更多的微粒发生碰撞,从而

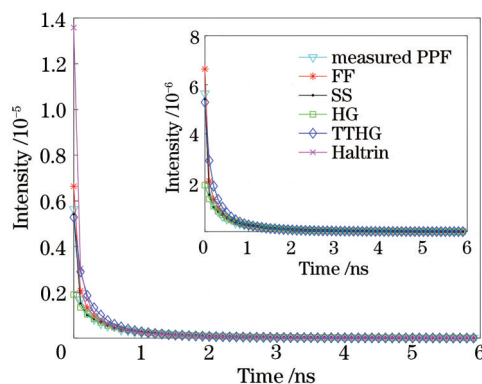


图 5 清澈海洋环境下采用不同相函数时 CIR 仿真曲线
Fig. 5 CIR simulation curves of different phase functions under clear ocean environment

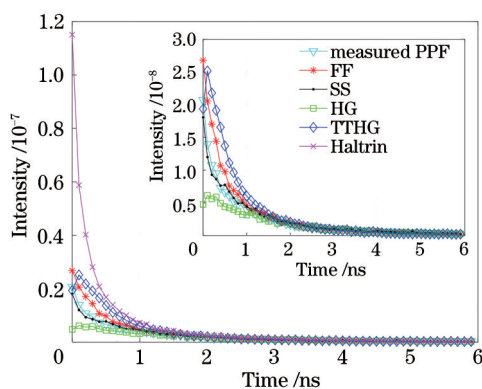


图 6 近海海岸环境下采用不同相函数时 CIR 仿真曲线
Fig. 6 CIR simulation curves of different phase functions under offshore coastal environment

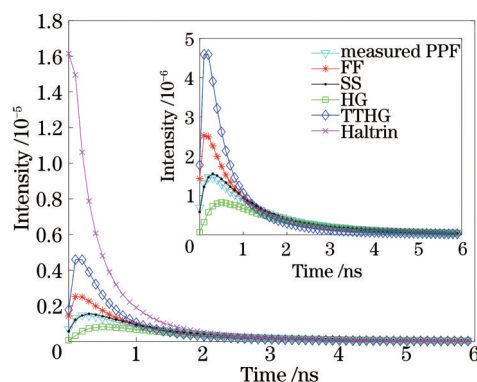


图 7 浑浊海港环境下采用不同相函数时 CIR 仿真曲线图
Fig. 7 CIR simulation curves of different phase functions under turbid harbor environment

导致吸收和散射的次数变多、运动路径加长、光的衰减程度加深,接收信号脉冲的时延展宽也变得愈加严重。就相函数本身的比较而言,与作为测试标准的 PPF 相比,在 3 种不同的水质中,SS 相函数获得的数据拟合效果均是最好的,FF 次之,而 TTHG、HG 和 Haltrin 的拟合效果则不太理想。由于 Haltrin 相函数获得的 CIR 数据跟其他相函数的 CIR 相比差异比较大,导致其他相函数的 CIR 时延扩展不明显,特地在小图中标出了除 Haltrin 之外其他相函数的 CIR 曲线,以方便观察它们的区别。

3.2 相函数对误比特率性能仿真的影响

不同相函数对 CIR 的影响研究虽然在文献[16]中也有所涉及,不过仅仅局限于将仿真获取的、对应不同相函数的 CIR 曲线进行集中展示而已,忽略了 UWOC 系统通过仿真获得 CIR 的真正目的,其实是为了揭示发射信号与接收信号之间的形变关联,构造接收信号的时域卷积表达,并最终据此决定接收机的

接收策略这一核心。事实上,仅凭图 2 和图 3 的相函数曲线,以及图 5~7 的 CIR 曲线,还是很难断定这些相函数对系统仿真的影响到底有多大,加之不同相函数在不同的经典文献中都有广泛应用,更增加了对它们性能差异的研判难度。

从前面的描述和分析可知,因为 PPF 数据是自然水质的实测值,所以常用来作为测试与计算的基准,而其他相函数则是对该测试数据或简单大致、或复杂准确的拟合近似,这就导致由这些相函数得到的 CIR 数据间存在较大差异(可参见图 5~7 的仿真结果),那么再由这些仿真获取的 CIR 得到的接收信号的检测效果如何,才应该是最值得关注与研讨之处。此外,虽然表 2 和表 3 给出了较为详细的有关不同角度范围内各个近似相函数与理想 PPF 之间的 RMS 近似程度比较,但这些比较值亦仅代表了不同角度分段范围内的一定程度的差异,且仅局限于相函数本身;在实际的海洋散射环境中,不同水质、不同传输距离都会导致光子在水中传输过程中因碰撞产生的前向散射和后向散射的比率不同,甚至于不同散射角度范围内的散射比率都会有差异。故而,有必要从一个更加全面、综合的角度来考查散射相函数对系统性能的影响。所提方法开拓性地以 UWOC 系统 BER 为研究目标,基于图 5~7 获得的不同水质 CIR 数据,通过 Monte Carlo 仿真考查不同相函数的选取对系统 BER 仿真性能的影响。

光子的接收过程和后续处理流程如图 8 所示。从图中可以看到:当光子从光源发出,经过一系列的散射和吸收之后最终被透镜成功接收;接收到的光子经滤波之后由光电探测器(PD)将光信号转化为电流信号,然后经运算放大器电路进行放大,再经过低通滤波即可送到检测器进行最终的统计判决检测。

为简便起见,假设发射信号为强度调制“开关键控”(OOK),PD 选用 PIN 型光电二极管,接收环境为深海,也即可以忽略背景光的影响和水-气交界面的折射与吸收。由于采用的是 PIN 型光电二极管,故噪声源主要为放大电路电阻的热噪声^[24]。设信号传输速率为 500 Mbit/s,则符号宽度 T_s 为 2 ns。根据文献[24]所揭示的光-电转换数学关系,在考虑海洋传输 CIR 存在时间弥散也即存在多径效应的情况下,接收混合电流信号的时域数学表达式为

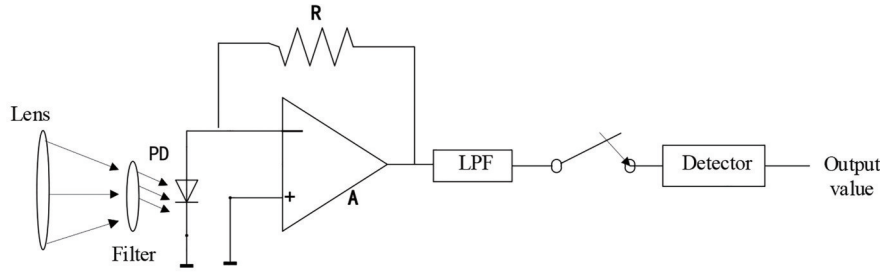


图 8 接收机工作流程图^[24]

Fig. 8 Flow chart of receiver working^[24]

$$r(t) = \sum_{l=0}^{W-1} h_l \left[\sum_{j=0}^{M-1} \frac{\eta e}{h\nu} P_i S(t - jT_s - lT_b) x_j \right] + n(t), \quad (22)$$

式中： $x_j \in \{0, 1\}$ 为 OOK 调制符号； $S(t)$ 为在区间 $[0, T_s]$ 取值的幅度为 1 的门函数； T_s 为 OOK 符号宽度； P_i 为发射信号功率； $\eta e/h\nu$ 为光-电转换效率或响应度，其中 η 为量子效率， e 为电子电荷， h 为普朗克常数， ν 为光在海水中传输时的频率； M 为一个数据帧的符号长度； h_l 为图 5~7 中仿真所获取的归一化 CIR 曲线的采样值； W 为采样数或者说多径传播数目，采样周期为 T_b ，为了尽可能准确地描述图中各种水质环境下的 CIR 数据，选取 $T_b = 0.1 \text{ ns}$ ，而针对清澈海洋、沿岸海水和浑浊海港 3 种水质，分别设置多径数目 W 为 15, 35, 60； $n(t)$ 则代表均值为零，方差为 $\sigma^2 = 4KTBF/R$ 的加性高斯噪声，其中 K 为玻尔兹曼常数， T 为开尔文温度， B 为电子带宽， F 为噪声指数， R 为负载电阻。

本实验组考虑的接收机检测方案有两种：对于清澈海洋水质，由图 5 各相函数所对应的 CIR 仿真结果可知，半功率时延扩展都很小 ($\ll 0.5 \text{ ns}$)，相较于 OOK 信号 2 ns 的符号宽度，其总计 15 径的多径时延 (约 $15 \times 0.1 = 1.5 \text{ ns}$) 加上近似指数衰减的单调衰落特性，基本可以忽略传输信号间的 ISI，故接收机采用传统的匹配滤波 (MF) 检测^[25] 即可恢复原始电流信号；而对于沿岸海水和浑浊海港水质，由图 6、7 仿真曲线可知，半功率时延扩展已接近甚至超过发射信号符号宽度 T_s 的一半，此时已不能忽略 ISI 的影响，传统 MF 已不能有效检测出信号，故需采用额外的 ISI 抑制措施。将 (22) 式重写为

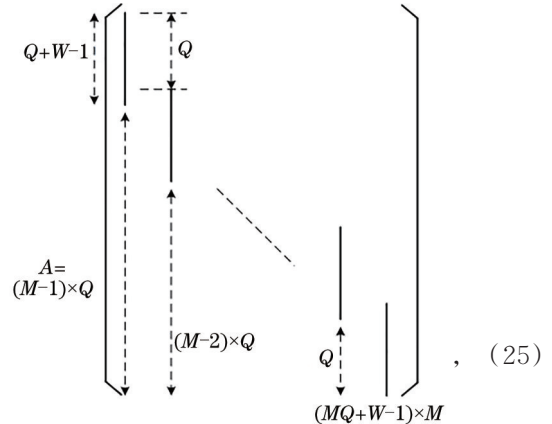
$$r(t) = \sum_{l=0}^{W-1} h_l \left[\sum_{j=0}^{M-1} i_j S(t - jT_s - lT_b) \right] + n(t), \quad (23)$$

式中： $i_j = (\eta e/h\nu) P_i x_j$ 代表第 j 个 OOK 发送符号 x_j 所对应的接收电流。当以周期 T_b 对混合接收信号

$r(t)$ 进行采样，则不难得到矩阵-矢量形式的紧凑型离散接收信号，表达式为

$$\mathbf{r} = \mathbf{A}\mathbf{i} + \mathbf{n}, \quad (24)$$

式中： $M \times 1$ 维的 OOK 接收电流矢量 $\mathbf{i} = [i_0, i_1, \dots, i_{M-1}]^T$ ； \mathbf{n} 表示 $M \times 1$ 的高斯白噪声向量，其均值为 $\mathbf{0}$ ，协方差矩阵为 $\sigma^2 \mathbf{I}$ ， \mathbf{I} 为单位矩阵； \mathbf{A} 为 $(MQ + W - 1) \times M$ 维的广义信道矩阵。块结构形式为



式中： $Q = \lfloor T_s/T_b \rfloor$ 为信号的过采样数，其中 $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示向下取整操作。矩阵 \mathbf{A} 每一列中的粗竖直线皆代表长度为 $Q + W - 1$ 的卷积向量 $\mathbf{h} \otimes \mathbf{1}$ ，其中 CIR 曲线获得的离散采样序列 $\mathbf{h} = [h_0, h_1, \dots, h_{W-1}]^T$ ， $\mathbf{1} = [1, 1, \dots, 1]^T$ 是一个长度为 Q 的常数 1 值向量；除此之外的矩阵其他元素皆为 0。采用迫零块均衡算法 (ZF-BLE)^[26] 即可完全消除 ISI，恢复 (24) 式中原始发送 OOK 信号所对应的接收端电流信号。这一数学处理过程可以表述为

$$\hat{\mathbf{i}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{r} = \mathbf{i} + (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{n}, \quad (26)$$

式中： $\hat{\mathbf{i}}$ 为迫零块均衡算法得到的电流估计信号，包含原始 OOK 电流信号 \mathbf{i} 和放大了方差的高斯噪声

矢量项 $(\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{n}$ [27]。

经过上述匹配滤波或迫零块均衡干扰抑制的电流恢复信号,即可送到后续的最大似然(ML)检测器单元进行统计判决;通过选取适当的判决门限 [28] 就能获得最终的 OOK 判决信号。

3 种典型海洋水质下,分别选用匹配滤波或迫零块均衡检测算法的 UWOC 系统 BER 仿真的主要系统参数如表 4 所示。对应不同水质和传输距离的 BER 仿真结果则如图 9~11 所示。

表 4 UWOC 系统 BER 仿真主要参数总结

Table 4 Summary of main parameters for UWOC BER simulations

Simulation parameter	Value or method
Quantum efficiency	0.8
Planck constant $/(J \cdot s)$	6.63×10^{-34}
Electronic charge $/C$	1.6×10^{-19}
Light velocity in water $/(m \cdot s^{-1})$	2.26×10^8
Boltzmann constant $/(J \cdot K^{-1})$	1.38×10^{-23}
Electronic bandwidth $/GHz$	2
Noise index	4
Equivalent temperature $/K$	290
Load resistance $/\Omega$	100
Symbol rate $/(Mbit \cdot s^{-1})$	500
Receiver algorithm	MF/ZF+ML

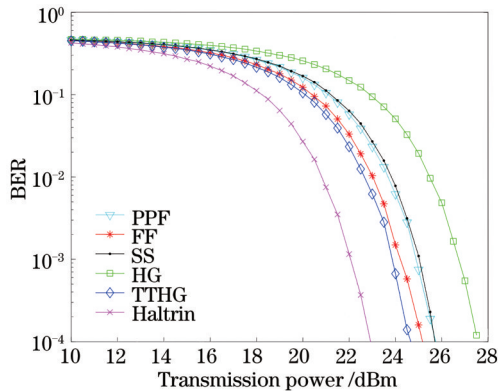


图 9 清澈海洋环境不同相函数 BER 仿真曲线(MF)
Fig. 9 BER simulation curves of different phase functions under clear ocean environment (MF)

由图 9 可知,对应清澈海洋水质,在忽略 ISI 而采用 MF 检测的情形下,5 种近似相函数计算获得的系统 BER 与作为基准的 PPF 所对应的标准 BER 相比,总体而言差距不是非常大。以语音通信所需满足的误码率上限 BER 等于 10^{-3} 为例, TTHG、FF、SS、HG、Haltrin 相函数所对应的信号发射功率分别为 23.8 dBm、24.3 dBm、25 dBm、26.8 dBm、

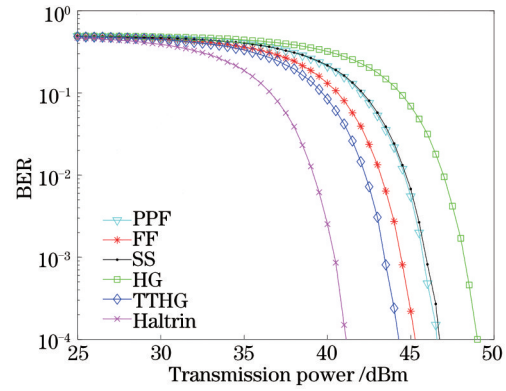


图 10 近海海岸环境不同相函数 BER 仿真曲线(ZF)
Fig. 10 BER simulation curves of different phase functions under offshore coastal environment (ZF)

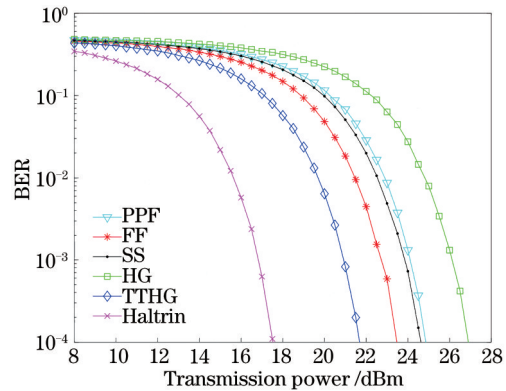


图 11 浑浊海港环境不同相函数 BER 仿真曲线(ZF)
Fig. 11 BER simulation curves of different phase functions under turbid harbor environment (ZF)

22.1 dBm,与作为基准的 PPF 所对应的发射功率 24.8 dBm 相比,误差分别为 4.0%、2.0%、0.8%、8.1%、10.9%。显然,SS 相函数经仿真获得的 BER 所对应的发射功率距“真实值”的误差最小,其次为 FF、TTHG,而 HG 和 Haltrin 仿真得到的误差最大。不过,SS 的高准确度是以复杂的计算表达式为代价的,在 Monte Carlo 仿真过程中当需要由生成的随机变量 ϵ_θ 反解散射角 θ_s 时,如(2)式,即便采取查表的方法,也因为分段函数的性质而令求解过程比较烦琐。比较而言,TTHG 相函数能获得反解散射角 θ_s 的一元非线性方程,可以由数值计算方法快速获得精确解,且最后的 BER 所对应的发射功率误差在 4.0% 左右,小于工程上允许的 5%~8% 的误差放宽范畴。相反,HG 相函数表达式虽然非常简单,反射极角更可以由(5)式直接闭型求解,但误差达到 8.1%;Haltrin 相函数的散射角反解也比较麻烦,误差更是高达 10.9%,因此这两个相函数在清澈海洋水质下进行仿真时对系统 BER 的影响巨大。

进一步由图 10 和图 11 的仿真对比结果可以发现,在近海海岸和浑浊海港水质环境下,由于无法忽略 ISI 的影响而必须采用 ZF 检测算法时,仿真得到的 5 种近似相函数下的系统 BER 与 PPF 标准 BER 相比,差距仍然非常明显。仍以 BER 等于 10^{-3} 为度量标准,在近海海岸水质下采用 TTHG、FF、SS、HG、Haltrin 相函数仿真 CIR 并进而获得 BER 时,由仿真数据显示所需的最低发射功率分别为 43.5 dBm、44.5 dBm、46 dBm、48.3 dBm、40.5 dBm,与基准 PPF 对应的“准确”发射功率 45.8 dBm 相比,误差分别为 5.0%、2.8%、0.4%、5.5%、11.6%;同样的,在浑浊海港水质下,当采用 TTHG、FF、SS、HG、Haltrin 相函数仿真时所需的发射功率则分别为 20.8 dBm、22.6 dBm、23.9 dBm、26.1 dBm、16.8 dBm,与基准相函数 PPF 计算的标准发射功率 24.1 dBm 相比,误差依次为 13.7%、6.2%、0.83%、8.3%、30.3%。对比图 10 和图 11 的 BER 曲线近似程度和上述定量数据计算值可以看出,近海海岸和浑浊海港这两种水质下,当采用迫零块均衡接收机以抑制 ISI 时,SS 相函数得到的 CIR 对系统检测的影响仍然是最小的,其次是 FF,再次是 HG 和 TTHG, Haltrin 的性能最差,误差也最大。HG 和 TTHG 这两个相函数在近海海岸水质下的性能,从百分误差的角度而言相差不多,但在浑浊海港水质下 TTHG 的误差则远比 HG 大;此外,不管何种水质, HG 相函数都会低估检测器的性能,即所获 BER 跟基准 PPF 的数据相比会变差;而 TTHG 相函数则会高估检测器性能,亦即会得到比基准值更好的误码率。

总之,由 3 种水质下不同检测器的 BER 仿真结果可以看出:如果需要采用近似相函数以逼近 PPF 实测数据,从精确性和满足工程误差的角度而言,不论何种水质都可以考虑 SS 和 FF 相函数;HG 和 TTHG 相函数则依赖于水质,清澈海洋和近海海岸水质下 TTHG 相函数要优于 HG 相函数,且误差在 5% 之内,浑浊海港水质下则 HG 函数的性能占优; Haltrin 相函数则在 3 种水质下与基准值相比都是最差的,且远超 5%~8% 的工程误差限。

4 结 论

主要基于 Monte Carlo 建模方法,研究了不同海洋水质下光学界普遍采用的 PPF 以及相应的 HG、TTHG、SS、FF 和 Haltrin 5 种近似相函数对 UWOC

系统平均 BER 这一关键性能指标仿真的影响并给出使用建议。基于 Monte Carlo 仿真的 UWOC 系统误码检测性能仿真研究结果表明:1) 仅仅在不同散射角度范围内对 CIR 仿真数值 RMS 误差进行比较,还不能据此全面说明不同散射相函数对系统性能仿真准确性的影响;2) 当采用 OOK 调制与 PIN 光电二极管,考虑不同水质下 ISI 对检测算法的影响之后,对 UWOC 系统 BER 的仿真研究结果表明,不同散射相函数在不同水质下的表现不同,不论何种海洋水质,SS 和 FF 相函数对 BER 仿真的影响最小,都非常接近作为基准的 PPF 获得的 BER 数据。HG 和 TTHG 相函数的影响则依赖于水质,清澈海洋和近海海岸水质下只有 TTHG 相函数的性能接近 SS 和 FF 并满足工程误差需求,而 HG 相函数则在浑浊海港水质下更接近作为基准的 PPF 相函数,不过不论是 HG 还是 TTHG,这二者与基准值之间的仿真误差仍然比较大,无法满足工程需求;此外,不管何种水质, HG 相函数都会低估检测器的性能,而 TTHG 则会高估检测器的表现;至于 Haltrin 散射相函数在 3 种水质下的 BER 偏差都是最大的,远超 5%~8% 的工程误差限。

参 考 文 献

- [1] Spagnolo G S, Cozzella L, Leccese F. Underwater optical wireless communications: overview[J]. *Sensors*, 2020, 20(8): E2261.
 - [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] Leathers R A, Downes T V, Davis C O, et al. Monte Carlo radiative transfer simulations for ocean optics: a practical guide[R]. Washington, D.C.: Defense Technical Information Center, 2004.
 - [4] Mobley C D. Light and water: radiative transfer in natural waters[M]. Salt Lake City: Academic Press, 1994.
 - [5] Petzold T J. Volume scattering functions for selected ocean waters[R]. San Diego: Scripps Institution of Oceanography Visibility Lab, 1972.
 - [6] Ji Y, Fu S, Tao Z H, et al. Biological cell phase imaging system integrated with optical scattering information[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(9): 091701.
- 季颖,傅爽,陶兆禾,等.整合光散射信息的生物细胞相位成像系统[J].激光与光电子学进展,2019,56(9):091701.

- [7] Fournier G R, Forand J L. Analytic phase function for ocean water[J]. *Proceedings of SPIE*, 1994, 2258: 194-201.
- [8] Fournier G R, Jonasz M. Computer-based underwater imaging analysis[J]. *Proceedings of SPIE*, 1999, 3761: 62-70.
- [9] 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.
- [10] Cox W C. Simulation, modeling, and design of underwater optical communication systems[D]. Raleigh: North Carolina State University, 2012: 19-34.
- [11] Cox W C. Photonator[EB/OL]. (2012-07-17)[2021-02-01]. <https://github.com/gallamine/Photonator>.
- [12] Mobley C D, Sundman L K, Boss E. Phase function effects on oceanic light fields[J]. *Applied Optics*, 2002, 41(6): 1035-1050.
- [13] Sahu S K, Shanmugam P. Semi-analytical modeling and parameterization of particulates-in-water phase function for forward angles[J]. *Optics Express*, 2015, 23(17): 22291-22307.
- [14] Sahu S K, Shanmugam P. Scattering phase function for particulates-in-water: modeling and validation[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9882: 98821H.
- [15] 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.
- [16] Umar A A B, Leeson M S, Abdullahi I. Modelling impulse response for NLOS underwater optical wireless communications[C]//2019 15th International Conference on Electronics, Computer and Computation (ICECCO), December 10-12, 2019, Abuja, Nigeria. New York: IEEE Press, 2019: 1-6.
- [17] Umar A A B, Leeson M S. Performance of non-line-of-sight underwater optical wireless communications [C]//2019 IEEE 2nd British and Irish Conference on Optics and Photonics (BICOP), December 11-13, 2019, London, UK. New York: IEEE Press, 2019: 1-4.
- [18] Zhang Y, Wang H Q, Cao M H, et al. Bit error rate of atmospheric optical multiple input multiple output system with pulse position modulation under influence of combined effect[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(9): 090602.
- 张悦, 王惠琴, 曹明华, 等. 联合效应影响下脉冲位置调制的大气光多输入多输出系统的误码率[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(9): 090602.
- [19] Wu Y, Mei H P, Wei H L. Performance analysis of free-space optical communication system under joint channel conditions[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(5): 050101.
- 吴琰, 梅海平, 魏合理. 联合信道条件下自由空间光通信系统性能分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(5): 050101.
- [20] Tang S J, Dong Y H, Zhang X D. Impulse response modeling for underwater wireless optical communication links[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2014, 62(1): 226-234.
- [21] Huang A P, Tao L W. Monte Carlo based channel characteristics for underwater optical wireless communications[J]. *IEICE Transactions on Communications*, 2017, E100.B(4): 612-618.
- [22] Haltrin V I. Two-term Henyey-Greenstein light scattering phase function for seawater[C]//IEEE 1999 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. June 28-July 2, 1999, Hamburg, Germany. New York: IEEE Press, 1999: 1423-1425.
- [23] Haltrin V I. Theoretical and empirical phase functions for Monte Carlo calculations of light scattering in seawater [C]//4th International Conference on Remote Sensing for Marine and Coastal Environments, 1997:17-19.
- [24] Xu F, Khalighi M A, Bourennane S. Impact of different noise sources on the performance of PIN- and APD-based FSO receivers[C]//International Conference on Telecommunications, June 15-17, 2011, Graz, Austria. New York: IEEE Press, 2012: 211-218.
- [25] Proakis J G, Salehi M. Digital communications[M]. 5th ed. New York: McGraw-Hill, 2007.
- [26] Golub G H, Loan C F V. Matrix computations[M]. 3rd ed. Baltimore: Johns Hopkins University Press, 1996.
- [27] Klein A, Kaleh G K, Baier P W. Zero forcing and minimum mean-square-error equalization for multiuser detection in code-division multiple-access channels [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 1996, 45(2): 276-287.
- [28] Agrawal G P. Fiber-optic communication systems [M]. New York: John Wiley & Sons, 2002.