

水下散射信道信号到达角度分布研究

刘涛¹, 张洪明^{1,2}, 宋健^{1,2}

¹清华信息科学与技术国家实验室, 清华大学电子工程系, 北京 100084;

²深圳市数字电视系统重点实验室(广东省数字电视系统重点实验室), 深圳清华大学研究院, 广东 深圳 518057

摘要 基于多次散射模型, 设计了基于蒙特卡罗仿真模型的 LED 传输系统, 研究了不同水体环境下接收信号到达角度和接收机视场角对接收信号功率和接收信噪比的影响。在纯水和纯净大洋水环境下, 接收信号功率集中分布在 $0^\circ \sim 3^\circ$, 较小的接收机视场角 (1°) 可以获得最大信噪比。在港口水和沿海水环境下, 信号功率的分布显著扩展, 特别是港口水环境下扩展到 $0^\circ \sim 90^\circ$ 。在沿海水环境下, 当接收机视场角为 8° , 可以获得最大信噪比; 在港口水环境下, 接收视场角增大到 30° , 可以获得最大信噪比。

关键词 光通信; 水下散射信道; 蒙特卡罗仿真; 到达角度; 视场角

中图分类号 TN929.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0306003

Distribution of Arriving Angle of Signal in Underwater Scattering Channel

Liu Tao¹, Zhang Hongming^{1,2}, Song Jian^{1,2}

¹Tsinghua National Laboratory of Information Science and Technology (TNLIST), Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

²Shenzhen City Key Laboratory of Digital TV System (Guangdong Province Key Laboratory of Digital TV System), Research Institute of Tsinghua University in Shenzhen, Shenzhen, Guangdong 518057, China

Abstract Based on multi-scattering model, we design an LED transmission system based Monte-Carlo simulation model, and study the influence of arriving angle of the received signal and field of view (FOV) of the receiver on the received signal power and the received signal-to-noise ratio (SNR) under different water environments. Under pure water and clear ocean water environments, the received power is mainly distributed at the arriving angle range of $0^\circ \sim 3^\circ$, and when the receiver with small FOV (1°), the maximum received SNR can be achieved. While under harbor and coastal water environments, the received power distribution obviously spread, especially for harbor water, the distribution expands from 0° to 90° . Under coastal water environment, when the receiver FOV is set at 8° , the maximum SNR is achieved. Under harbor water environment, when the receiver FOV increases to 30° , the maximum SNR is achieved.

Key words optical communications; underwater scattering channel; Monte-Carlo simulation; arriving angle; field of view

OCIS codes 060.4510; 290.4210; 010.4458

1 引言

随着人类海洋开发战略的实施, 人们在水下资源探测、环境监控、水下作业机器人应用等领域展开

了广泛的研究^[1]。水下通信作为其中重要的研究内容, 引起了人们强烈的关注。水声通信作为传统的水下通信方式具有传输距离远(千米级)、可靠性高的特点。但是数据传输率非常低(kb/s 级), 传输时

收稿日期: 2017-08-29; 收到修改稿日期: 2017-10-17

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0403403)

作者简介: 刘涛(1983—), 男, 博士研究生, 主要从事水下信道建模与特性研究, 水下 LED 无线光通信系统等方面的研究。E-mail: taoliu2004@gmail.com

导师简介: 张洪明(1975—), 男, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要从事可见光通信, 大气、水下无线光通信与定位等方面的研究。E-mail: zhbm@tsinghua.edu.cn(通信联系人)

延大,很难满足实时的高速数据传输的需求^[2]。水下光通信利用蓝绿频段(430~550 nm)的光波进行通信,可以很好地解决水声通信在传输速率和时延的局限性。其原因有三点:1)蓝绿光波段在水中具有最小的损耗;2)光波在水中的传输速度为 2.25×10^8 m/s,传输时延几乎可以忽略;3)光信号的调制速率可以达到 MHz~GHz 量级,实现高比特率传输^[3-4]。随着发光二极管(LED)器件的飞速发展,因其具有的高调制速率、高光效、宽光束散角、小型化等特点,基于 LED 的水下中短距离高速率无线光通信系统备受人们关注^[5-6]。

水下光通信的最大挑战在于水下信道的特性分析。不同于大气光学信道,水下信道的显著特点在于其强散射特性^[7]。尤其是对于浑浊的沿海水和港口水,信号在传输的过程中会经历多次散射后到达接收端,这样使得接收到的光信号在时间上、空间上产生弥散,同时光信号在到达角度也会发生弥散。信号到达角度的弥散程度对于接收机的设计提出了不同的要求。基于水体较强的散射特性,研究人员提出了水下多次散射模型。该散射模型具有直观、精确的特点,但是很难获得理论上解析的结果,因此通常结合蒙特卡罗仿真的方法对水下信道特性加以研究。在文献[7-8]中,利用该模型仿真研究了水下信道的冲激响应特性,在文献[9]中研究了信道的路径损耗特性。以上的研究主要集中于对激光发射系统的研究,对于 LED 光源的研究则相对薄弱,针对信号到达角度特性研究也相对较少。在文献[10]中,作者利用单次散射模型研究了接收信号到达角度的分布特性,并得到了一些理论的结果。但是无论是假设光源的发射束散角为 0° ,还是假设水体散射相函数服从 Henyey-Greenstein 分布,都与实际存在一定的偏差。同时单次散射模型无法很好地描述强散射水体的散射特性。

基于此,本文设计了基于 LED 光源的改进型仿真模型。对不同水体条件下的信号到达角度分布特性,以及不同接收机视场角(FOV)下的信号功率和接收信噪比(SNR)进行了研究。在 LED 光源模型上选择了朗伯分布模型,该模型的合理性在实验室水槽环境下得到了验证。基于文献[11]提出的自然水体的散射相函数(SPF)模型,该模型与文献[12]实测的 SPF 具有高度的一致性,说明本文的设计具有较高的可信度。研究结果表明,在纯水和纯净大洋水环境下,接收信号分布在很小的角度范围($0^\circ \sim 3^\circ$)内,较小的接收机 FOV 可以获得全部的接收功

率;在浑浊的沿海水和港口水环境下,接收信号的分布明显弥散,特别在港口水环境下,接收信号在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 范围内都存在。在天空背景光噪声环境下,基于最大接收信噪比(SNR)标准,研究了不同水体条件下的最优接收 FOV 的选择。

2 多次散射的蒙特卡罗仿真模型

多次散射蒙特卡罗仿真模型中,需要产生三个关键的随机变量,分别为光子初始的发射角度、光子单次游走距离和光子发生散射后的传输方向。首先介绍这三个关键随机变量产生的方法,最后给出具体的仿真流程。

2.1 LED 光源的朗伯分布模型

光子的初始发射角度可以由光源的分布模型确定。对于激光光源,前人采用了高斯分布模型。但是这个模型并不适用于本文研究的 LED 光源,这里采用了归一化的朗伯分布模型^[13]:

$$\psi(\theta_0, \varphi_0) = \frac{1 + \rho}{2\pi} \cos^{\rho}(\theta_0), \quad (1)$$

式中, φ_0 和 θ_0 分别为发射光束的方位角和天顶角, $\rho = -\ln 2 / \ln[\cos(\theta_{1/2}/2)]$ 为一个与光源半光功率角 $\theta_{1/2}$ 相关联的参数。在实验室水槽环境下测试了 LED 光源的分布并进行朗伯分布的拟合,实验场景和测试结果如图 1 所示。在纯水环境下,收发机间距 L 设置为 0.82 m,在极短距离下信号不会发生散射,进而保证能够准确测试到 LED 的初始分布。接收端采用灵敏度很高、探测面积极小的雪崩二极管(APD)进行探测,通过在水平方向上以步长 $\Delta d = 1$ cm 移动测量不同发射角度上的接收功率。测量结果与朗伯分布吻合得较好,表明了该分布的合理性。(1)式中光源在方位角 φ_0 方向上服从 $[0, 2\pi]$ 的均匀分布。因此根据(1)式可以产生随机的光子发射方位角和天顶角,即

$$\begin{cases} \varphi_0 = 2\pi \cdot N(0, 1) \\ \theta_0 = \arccos\{[1 - N(0, 1)]^{1/(\rho+1)}\} \end{cases}, \quad (2)$$

式中 $N(0, 1)$ 为 $[0, 1]$ 均匀分布随机数。

2.2 光子单次游走距离

光子单次游走距离定义为光子在均匀介质中未发生散射和吸收所传输的距离,即光子由一个散射点到下一个散射点时所经历的距离。光子单次游走距离可以用负指数分布来描述,如^[14]

$$p(l) = c \exp(-cl), \quad (3)$$

式中, l 为光子单次游走距离, c 为水介质损耗系数。根据(3)式可以产生随机的单次游走距离,如

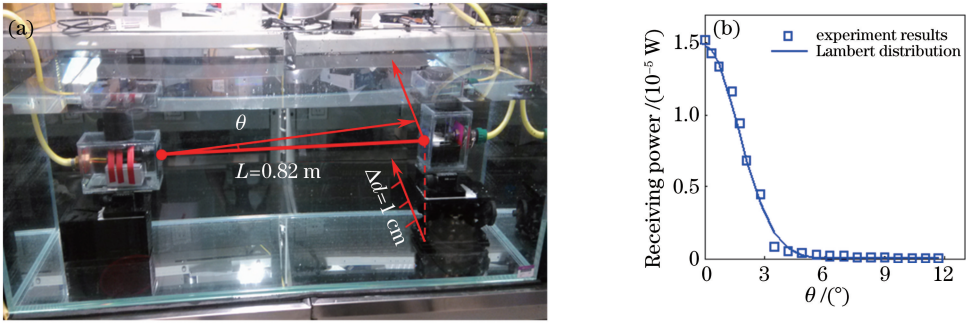


图 1 LED 光源分布测量

Fig. 1 LED source distribution measurement. (a) Experiment setup; (b) LED source distribution

$$l = \frac{-\ln[1 - N(0,1)]}{c} \quad (4)$$

2.3 水介质的散射相函数

水介质的 SPF 是水体非常重要的特性,它描述了光子与水介质发生散射作用后,向各个方向散射的概率分布。根据 SPF 可以获得光子散射后的传输方向。纯水由单一的水分子成分组成,它的 SPF 由 Einstein-Smoluchowski 波动理论获得,如^[14]

$$\beta_{sw}(\varphi, \theta) = \frac{3}{8\pi} \cdot \frac{1+\delta}{2+\delta} \cdot \left(1 + \frac{1-\delta}{1+\delta} \cos^2 \theta\right), \quad (5)$$

式中, φ 和 θ 分别表示散射的方位角和天顶角; δ 为水分子的极化比,取 0.09。(5)式中散射方位角 φ 在 $[0, 2\pi]$ 范围内均匀分布。

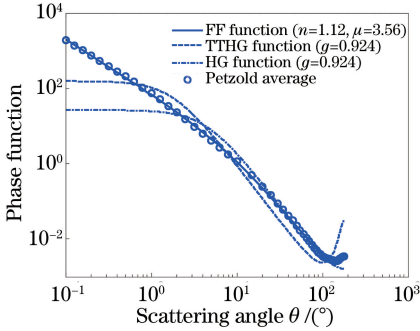


图 2 自然水体的散射相函数(实验测量和几种理论函数)

Fig. 2 SPF of nature water (measurement and theoretical function)

自然界的水体组成除了水分子,还包含了悬浮于水中的无机大分子、有机大分子和矿物质粉尘。不同水介质的粒子尺度分布差异很大。不同粒子尺度的散射特性有明显的差异,因此很难获得自然水体 SPF 的精确解析表达式。在文献[12]中,作者给出了三种典型水体,即纯净大洋水、沿海水和港口水平均 SPF 的实验测量结果,如图 2 所示。在文献[15-16]中,分别利用了 Henyey-Greenstein(HG)和 Two Term Henyey-Greenstein(TTHG)函数模拟

了水体的 SPF,如图 2 所示,其中的非对称因子 $g = 0.924$ 与文献[12]中平均 SPF 计算的 g 一致,但与文献[12]测量的 SPF 相差很大,均方根(RMS)分别为 576.5 和 539.3。除此之外,在文献[11]中,作者假设水体粒子服从 Junge-type 分布,给出了 SPF 近似表达,即 Fournier-Forand(FF)散射模型,如^[11]

$$\beta_{FF}(\theta) = \beta_0(\theta) + \beta_0(\pi)(3\cos^2\theta - 1)/4, \quad (6)$$

$$\beta_0(\theta) = \frac{1}{4\pi} \frac{1}{(1-\delta)^2 \delta^v} \times$$

$$\left\{ [v(1-\delta) - (1-\delta^v)] + \frac{4}{u^2} [\delta(1-\delta^v) - v(1-\delta)] \right\}, \quad (7)$$

式中, θ 为散射天顶角, $v = (3 - \mu)/2$, $\delta = u^2 / [3(n-1)^2]$, $u = 2\sin(\theta/2)$, μ 为 Junge 分布中的指数项, n 为水体折射率。利用(6)式,对文献[12]中的测量结果进行拟合,如图 2 所示,拟合的 RMS 为 15.3,几乎与实验测量结果一致。因此可以利用(6)式产生随机的散射方位角和天顶角,(6)式中散射方位角在 $[0, 2\pi]$ 范围内均匀分布,散射天顶角 θ 满足

$$\int_0^\theta 2\pi \cdot \beta_{FF}(\theta') \sin \theta' d\theta' = N(0,1). \quad (8)$$

公式(8)左边的积分结果用 $f(\theta)$ 表示,即

$$f(\theta) = \frac{1}{(1-\delta)\delta^v} \left[(1-\delta^{v+1}) - \frac{u^2}{4}(1-\delta^v) \right] + \frac{\cos \theta \sin^2 \theta (1-\delta_\pi^v)}{16\pi(\delta_\pi - 1)\delta_\pi^v}. \quad (9)$$

将(9)式代入(8)式依然很难获得关于散射天顶角 θ 的解析表达形式。但是若把 θ 取不同值时 $f(\theta)$ 的计算结果列入表格中,当产生一个 $[0, 1]$ 均匀分布随机数,通过查表的方法选择最接近这个随机数对应的 θ 值作为随机产生的散射天顶角。

2.4 蒙特卡罗仿真流程

仿真流程如图 3 所示。仿真过程由三个部分组成,分别为光子初始化部分、光子游走部分和光子接

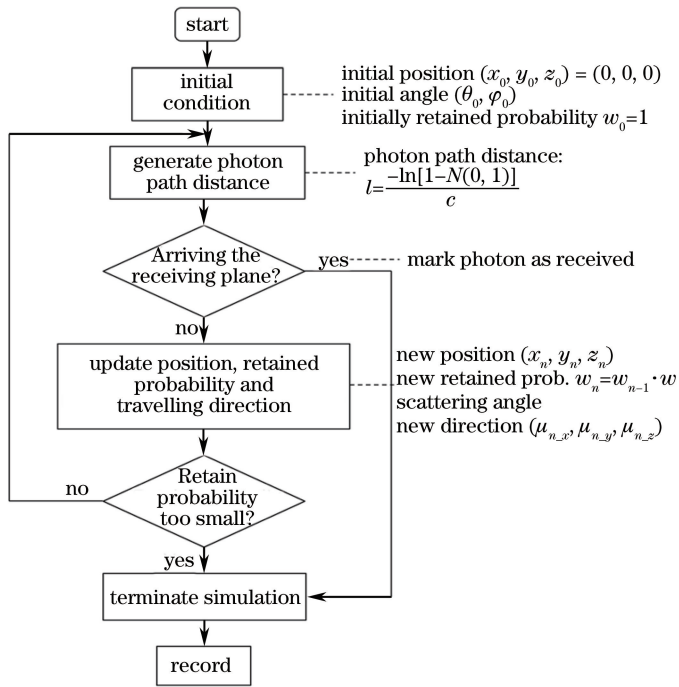


图 3 仿真流程图

Fig. 3 Flow chart of simulation

收部分。在初始化部分,光子位于直角坐标系的原点 $(x_0, y_0, z_0) = (0, 0, 0)$,接收平面位于 $z = Z_0$,光轴为 z 轴的正方向。光子的初始发射角度 (φ_0, θ_0) 由(2)式产生,并转换为光子的初始方向相量 $(\mu_{0_x}, \mu_{0_y}, \mu_{0_z}) = (\sin \theta_0 \cos \varphi_0, \sin \theta_0 \sin \varphi_0, \cos \theta_0)$ 。设置光子的初始留存概率 $w_0 = 1$ 。光子沿着初始方向前进一个随机距离

l ,这个距离可以通过(4)式产生。如果光子到达接收平面(满足 $z_0 + l\mu_{0_z} \geq Z_0$),标记光子为接收状态,则该光子的仿真结束。否则光子将会发生散射,需要更新光子位置坐标,散射后的方向向量和留存概率。光子的位置坐标更新为 $(x_1, y_1, z_1) = (x_0, y_0, z_0) + l \cdot (\mu_{0_x}, \mu_{0_y}, \mu_{0_z})$ 。散射后光子传输的方向向量可表示为^[17]

$$\begin{bmatrix} \mu_{1_x} \\ \mu_{1_y} \\ \mu_{1_z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mu_{0_x}\mu_{0_z} / \sqrt{1 - (\mu_{0_z})^2} & \mu_{0_y} / \sqrt{1 - (\mu_{0_z})^2} & \mu_{0_x} \\ \mu_{0_y}\mu_{0_z} / \sqrt{1 - (\mu_{0_z})^2} & \mu_{0_x} / \sqrt{1 - (\mu_{0_z})^2} & \mu_{0_y} \\ -\sqrt{1 - (\mu_{0_z})^2} & 0 & \mu_{0_z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin \theta \cos \varphi \\ \sin \theta \sin \varphi \\ \cos \theta \end{bmatrix} \quad (10)$$

光子的留存概率更新为 $w_1 = w_0 \omega = w_0 b/c$ (其中 ω 为反照系数, b 为散射系数, c 为损耗系数)。更新后的留存概率和预设的阈值 T (选择阈值 T 满足 $T < \omega^{10}$, 从而在整个仿真过程中支持 10 次以上的散射) 进行比较。如果留存概率大于阈值 T ,光子继续上述过程,直到其到达接收平面。如果留存概率小于 T ,该光子的仿真过程结束。最后,记录下那些到达接收平面的光子的位置坐标、留存概率和到达的角度(即光子到达方向与光轴的夹角)。通过仿真大量的光子,就可以获得信号到达角度的分布特性。

3 仿真结果分析

分别仿真研究在纯水、纯净大洋水、沿海水和港

口水这 4 种水体环境下,接收信号的到达角度分布特性,仿真参数如表 1 所示。

通过蒙特卡罗仿真可以获得到达接收机口径上大量光子的留存概率以及到达角度。对于纯水和洁净大洋水,到达角度间隔取 0.05° ;对沿海水和港口水,到达角度间隔取 1° 。统计光子留存概率之和并进行归一化处理,即可获得信号功率在到达角度上的分布。4 种水体条件下接收信号角度分布如图 2 所示。由仿真结果可以看到,在纯水和纯净大洋水[见图 4(a), 4(b)]环境下,信号功率集中分布在 $0^\circ \sim 3^\circ$ 范围内,并且分布的极大值点位于 0° 附近。在沿海水[见图 4(c)]环境下,信号功率分布范围扩展到 $0^\circ \sim 10^\circ$,分布极大值点同样位于 0° 附近。在港

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameter

No.	Parameter	Value
1	LED half-power angle	3°
2	Wavelength	532 nm
3	Receiver aperture	24 cm
4	Transmission distance	12 m
5	¹ Water type 1: pure water	$b=0.003 \text{ m}^{-1}$, $c=0.02 \text{ m}^{-1}$
6	² Water type 2: clear ocean	$b=0.037 \text{ m}^{-1}$, $c=0.151 \text{ m}^{-1}$
7	² Water type 3: coastal water	$b=0.219 \text{ m}^{-1}$, $c=0.398 \text{ m}^{-1}$
8	² Water type 4: harbor water	$b=1.824 \text{ m}^{-1}$, $c=2.19 \text{ m}^{-1}$

Note:¹ The scattering and attenuation coefficient based on reference [18]; ²The scattering and attenuation coefficient based on reference [12]

口水[见图 4(d)]环境下,信号功率分布进一步扩展到 0°~90°,而且分布的极值点偏离 0°,在 15°角附近。仿真结果表明,对于弱散射水体如纯水和

纯净大洋水,接收信号功率几乎全部是直射信号分量。随着水体散射特性增强如沿海水,信号到达角度分布有所扩散。接收信号中直射信号分量占据主要部分,但是散射分量也占据了一定的比例。对于强散射水体如港口水,信号到达角度完全弥散,接收信号中散射分量占据主要部分,直射分量处于次要部分。

图 5 为对接收信号功率在到达角度上进行积分,获得接收信号功率累积分布。在纯水[见图 5(a)]环境下,1°接收机视场角就可以收获全部的功率。在洁净大洋水[见图 5(b)]环境下,3°接收机视场角可以收获 97%的信号功率。在沿海水[见图 5(c)]环境下,15°接收机视场角可以收获 97%的信号功率。在港口水[见图 5(d)]环境下,60°接收机视场角可以收获 96%的信号功率。由此得出,对于弱散射水体如纯水和纯净大洋水,较小的接收机视场角即可收获大部分信号功率,而对于强散射水体,如沿海水和港口水,需要较大的接收机视场角才能够收获大部分信号功率。

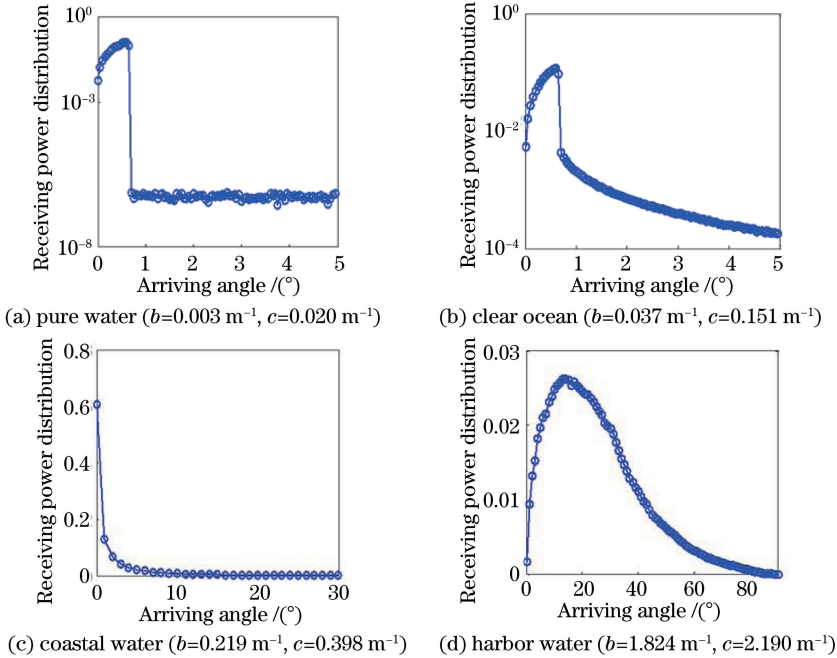


图 4 接收功率在信号到达角度上的分布

Fig. 4 Received power distribution versus arriving angle

最后研究了不同 FOV 接收 SNR 情况。尽管增加 FOV 可以显著提高接收信号功率,但是随着 FOV 的提高,接收到的噪声功率同样会增加,因此研究不同 FOV 的接收 SNR 更有意义。在浅水区域,在不考虑太阳直射接收机的情况下,水下的噪声主要是天空的背景光辐射。不失一般性,考虑天空背景在 532 nm

波段的辐射为 $1 \text{ nW}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{nm})$ ^[19],不同 FOV 下接收的噪声功率可以表示为^[20]

$$P_n = R_a \cdot \Delta\lambda \cdot \pi \cdot \phi^2 \cdot A_r, \quad (11)$$

式中, R_a 为天空背景辐射, $\Delta\lambda$ 为滤光片的宽度(取 20 nm), ϕ 为接收机视场角, A_r 为接收机面积。不同 FOV 的接收信号功率 P_r 通过仿真获得。在开

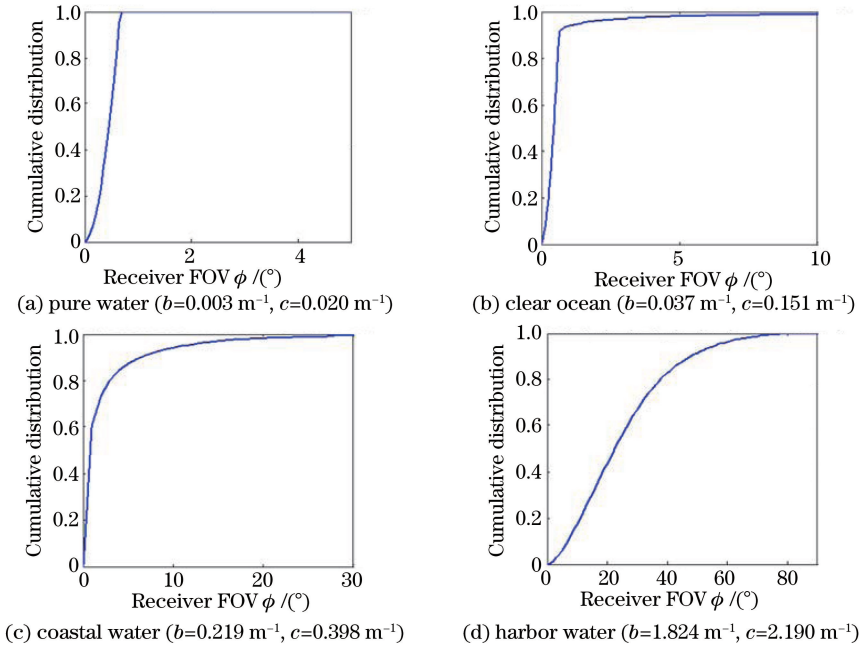


图 5 接收功率累积分布

Fig. 5 Cumulative distribution of received power

关键控(OOK)调制和光电倍增管(PMT)接收下,接收机的SNR可以表示为^[21]

$$R_{SN} = \frac{(m_1 - m_0)^2}{(\sigma_1 + \sigma_0)^2}, \quad (12)$$

式中 $m_1 = Ae(K_b + K_s)$, $m_0 = AeK_b$, $\sigma_1^2 = (Ae)2F \cdot (K_b + K_s) + \sigma_n^2$, $\sigma_0^2 = (Ae)2FK_b + \sigma_n^2$, 其中 $K_s = 2\eta P_r T_b \lambda / hc$, $K_b = \eta P_n T_b \lambda / hc$, A 为 PMT 的增益(一般为 10^6), e 为电子电量, F 为 PMT 的附加噪声因子

(一般为 1.01), η 为 PMT 的量子效率(一般为 0.23), h 为普朗克常数, c 为真空中光速, $\sigma_n^2 = 2K_e T_0 T_b / R_1$ 为热噪声(其中 K_e 为玻尔兹曼常数, T_0 为绝对温度, 选取为 300 K, T_b 为 OOK 信号的比特时间, 选取为 $1 \mu s$, R_1 为接收机内阻, 取值为 50Ω).

当纯水、洁净大洋水、沿海水、港口水传输距离分别为 100, 60, 12, 12 m 时, 不同接收机 FOV 下的接收 SNR, 分别如图 6(a)~(d)所示。可以看出, 对

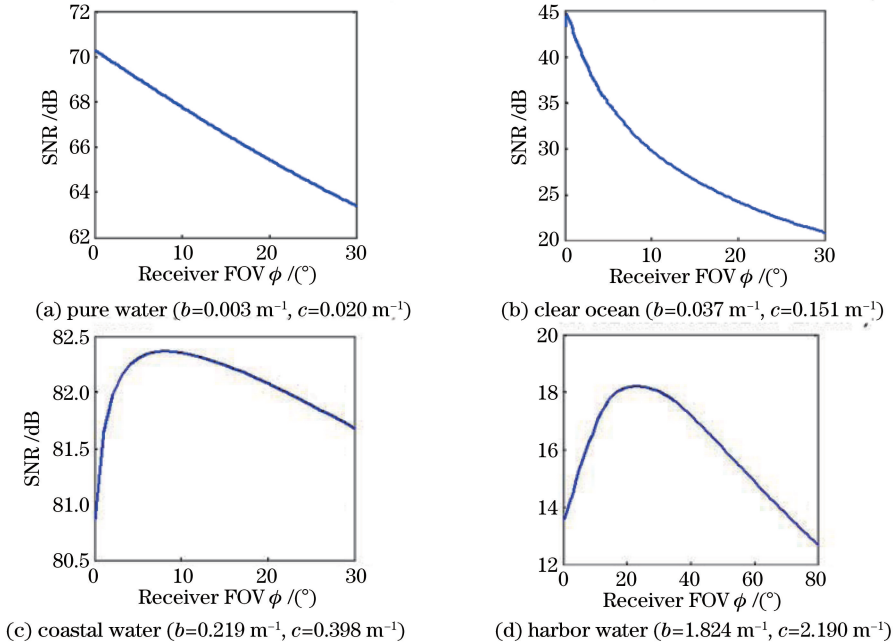


图 6 不同接收机 FOV 的接收 SNR

Fig. 6 Received SNR for different FOVs of receiver

于纯水和洁净大洋水信道环境, FOV 越小, SNR 越高。因为前面的分析表明, 在 1° 的 FOV 内就可以接收到几乎全部的信号功率, 增加 FOV 不会增加信号功率, 只是增加了噪声的功率, 因此随着 FOV 的增加信噪比逐渐下降。对于沿海水, 当 FOV 由 0° 逐渐增加到 8° 时, 可以改善 SNR, 但 FOV 进一步增加时, 噪声的增加强于信号功率的增加, 因此最优的接收 FOV 应该选择在 8° 附近。港口水则需要更大的 FOV 才能够达到最佳的接收 SNR, 当 FOV 在 30° 附近时具有最高的 SNR。

4 结 论

通过蒙特卡罗仿真的方法, 研究了 4 种水下散射信道接收信号功率随信号到达角度分布的规律, 以及接收机视场角对接收功率和接收 SNR 的影响。给出了适用于 LED 发射光源的多次散射模型仿真流程。其中 LED 光源采用了朗伯分布模型, 水体 SPF 采用了 FF 散射模型。仿真结果表明, 在纯水和纯净大洋水等弱散射水体环境下, 接收信号功率集中在 $0^\circ \sim 3^\circ$ 角度范围内。而随着水体散射强度增强, 信号到达角度分布明显弥散。尤其在港口水环境下, 接收信号在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 范围内分布, 而且分布的极大值点偏移到 15° 附近, 表明了接收信号中散射分量占据主导地位, 直射分量明显变弱。在纯水和纯净大洋水等弱散射水体环境下, 3° 接收机视场角可以满足接收需求, 而在港口水等强散射水体环境下, 则需要 60° 视场角满足接收绝大部分功率的需求。最后研究了在天空背景噪声条件下, 接收 SNR 与 FOV 的关系。在纯水和洁净大洋水环境下, FOV 约为 1° 时, 可以获得最大 SNR; 在沿海水环境下, FOV 为 8° 时, 获得了最大的 SNR; 对于散射最强的港口水, 接收 FOV 需要增大到 30° 才可以实现最大接收 SNR。

参 考 文 献

- [1] Hu S Q, Zhou T H, Chen W B. Performance analysis and simulation of maximum ratio combining in underwater laser communication [J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(12): 1206003.
胡思奇, 周田华, 陈卫标. 水下激光通信最大比合并分集接收性能分析及仿真 [J]. 中国激光, 2016, 43(12): 1206003.
- [2] Arnon S. Underwater optical wireless communication network [J]. Optical Engineering, 2010, 49(1): 015001.
- [3] Hu X H, Hu S Q, Zhou T H, *et al.* Rapid estimation of the maximum communication distance for an underwater laser communication system [J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(8): 0805007.
胡秀寒, 胡思奇, 周田华, 等. 水下激光通信系统最大通信距离的快速估计 [J]. 中国激光, 2015, 42(8): 0805007.
- [4] Oubei H M, Duran J R, Janjua B, *et al.* 4.8 Gbit/s 16-QAM-OFDM transmission based on compact 450-nm laser for underwater wireless optical communication [J]. Optics Express, 2015, 23(18): 23302-23309.
- [5] Donic M, Detweiler C, Vasilescu I, *et al.* Using optical communication for remote underwater robot operation [C]. 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2010: 11689668.
- [6] Xu J, Kong M, Lin A, *et al.* OFDM-based broadband underwater wireless optical communication system using a compact blue LED [J]. Optics Communications, 2016, 369: 100-105.
- [7] Gabriel C, Khalighi M A, Bourennane S, *et al.* Channel modeling for underwater optical communication [C]. 2011 IEEE GLOBECOM Workshops (GC Wkshps), Houston, TX, USA, 2011: 12589066.
- [8] Tang S, Dong Y, Zhang X. Impulse response modeling for underwater wireless optical communication links [J]. IEEE transactions on communications, 2014, 62(1): 226-234.
- [9] 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.
- [10] Zhang H, Hui L, Dong Y. Angle of arrival analysis for underwater wireless optical links [J]. IEEE Communications Letters, 2015, 19(12): 2162-2165.
- [11] Fournier G R, Jonasz M. Computer-based underwater imaging analysis [C]. SPIE, 1999, 3761: 62-70.
- [12] Petzold T J. Volume scattering functions for selected ocean waters [R]. [S.l.:s.n.], 1972.
- [13] Kahn J M, Barry J R. Wireless infrared communications [J]. Proceedings of the IEEE, 1997, 85(2): 265-298.
- [14] Mobley C D. Light and water: radiative transfer in natural waters [Z]. San Diego: Academic Press, 1994: 592.
- [15] 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.
- [16] Li J, Ma Y, Zhou Q, *et al.* Monte Carlo study on pulse response of underwater optical channel [J]. Optical Engineering, 2012, 51(6): 066001.
- [17] Cox W C. Simulation, modeling, and design of underwater optical communication systems [D]. Raleigh: North Carolina State University, 2012: 161-162.
- [18] Morel A. Optical properties of pure water and pure sea water [J]. Optical Aspects of Oceanography, 1974: 1-24.
- [19] Xu W Q. Research on wide-wave band measuring technique of sky background radiance [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Science, 2013. 徐文清. 宽谱段天空背景辐射测量技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013.
- [20] Kopeika N S, Bordogna J. Background noise in optical communication systems [J]. Proceedings of the IEEE, 1970, 58(10): 1571-1577.
- [21] Gagliardi R M, Karp S. Optical communications [M]. New York: Wiley-Interscience, 1976: 445.