

## 水下光场的迭代求解

何大华 李阳阳 周少杰

### Iterative solution of underwater scattering light field

HE Da-hua, LI Yang-yang, ZHOU Shao-jie

引用本文:

何大华, 李阳阳, 周少杰. 水下光场的迭代求解[J]. *中国光学*, 2022, 15(2): 297–305. doi: 10.37188/CO.2021-0162

HE Da-hua, LI Yang-yang, ZHOU Shao-jie. Iterative solution of underwater scattering light field[J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(2): 297-305. doi: 10.37188/CO.2021-0162

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2021-0162>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### LD面阵侧面泵浦Nd:YAG晶体吸收光场研究

Absorption light field of side-pumped Nd: YAG crystal in LD planar arrays

中国光学. 2018, 11(2): 206 <https://doi.org/10.3788/CO.20181102.0206>

#### 基于点光源和球面光源的集鱼灯照度模型比较研究

Comparative study on the illumination model of fishing lamps based on point light sources and spherical light sources

中国光学. 2019, 12(2): 274 <https://doi.org/10.3788/CO.20191202.0274>

#### 纳米尺度下的局域场增强研究进展

Advances in the local field enhancement at nanoscale

中国光学. 2018, 11(1): 31 <https://doi.org/10.3788/CO.20181101.0031>

#### 基于激光的测量技术在燃烧流场诊断中的应用

Applications of measurement techniques based on lasers in combustion flow field diagnostics

中国光学. 2018, 11(4): 531 <https://doi.org/10.3788/CO.20181104.0531>

#### 氢原子在少周期强激光场中阈上电离的电子波包干涉图像

Electron wave packet interference images in above-threshold ionization of hydrogen atoms by few-cycle intense laser fields

中国光学. 2019, 12(6): 1376 <https://doi.org/10.3788/CO.20191206.1376>

#### 空气导热作用下Nd:YAG晶体温场特性

Temperature field of Nd: YAG crystal under air heat transfer

中国光学. 2019, 12(3): 686 <https://doi.org/10.3788/CO.20191203.0686>

文章编号 2095-1531(2022)02-0297-09

## 水下光场的迭代求解

何大华\*, 李阳阳, 周少杰

(华中光电技术研究所—武汉光电国家研究中心, 湖北 武汉 430223)

**摘要:**水体对光线的散射是水下图像质量劣化的重要因素,为了定量分析在特定光源照射下水体散射的影响,建立了光线水下传输的散射模型,以此为基础推导出求解水下光场分布的Fredholm积分方程。在水中光线能量随距离的增大呈指数规律衰减,基于此,在水体散射函数为常数的情况下,给出了有边界条件时该积分方程的数值迭代求解方法,得到高精度的水下光场分布。以太阳、均匀亮度天空、水下点光源以及空中点光源为例,分别给出了水面平静时的水下光场的计算结果。该求解方法可推广应用于任意光源配置、任意边界条件下的水下光场分布,为严格推导水体点扩展函数及调制传递函数奠定了基础。

**关键词:**水下光电成像;水下光场;球面照度;体散射函数;Fredholm积分方程;数值计算

**中图分类号:** TN29; O435.1; O436.2 **文献标志码:** A **doi:** 10.37188/CO.2021-0162

## Iterative solution of underwater scattering light field

HE Da-hua\*, LI Yang-yang, ZHOU Shao-jie

(Huazhong Institute of Electro-Optics – Wuhan National Laboratory  
for Optoelectronics, Wuhan 430223, China)

\* Corresponding author, E-mail: 470444534@qq.com

**Abstract:** The scattering of light by water is an important factor in the deterioration of underwater image quality. In order to quantitatively analyze the influence of water scattering under the irradiation of a specific light source, the scattering model of underwater light transmission is established, and the Fredholm integral equation for solving the distribution of underwater light field is derived. Under conditions where the light energy underwater decays exponentially with an increase in distance and the volume scattering function of the water is constant, the numerical iterative solution method of the integral equation with boundary conditions is given and the high-precision underwater light field distribution can be obtained. Taking the sun, uniform sky brightness, and underwater and overwater point light sources as examples, the calculation results of their underwater light fields when the water surface is calm are given. This method can be extended to solve the distribution of underwater light fields under arbitrary light source configurations and arbitrary boundary conditions, which lays a foundation for strictly deriving a point spread function and modulation transfer function for water bodies.

收稿日期:2021-08-23; 修订日期:2021-09-25

基金项目:船舶重工装备预研联合基金(No. 6141B042006)

Sponsored by China Shipbuilding Industry Corporation Joint fund for Equipment Pre-Research( No. 6141B042006)

**Key words:** underwater optical imaging; underwater light field; spherical illuminance; volume scattering function; Fredholm integral equation; numerical calculation

## 1 引言

水下光电成像是利用可见光对水下目标进行成像的技术<sup>[1-12]</sup>,在国民经济乃至军事上有广泛的应用前景。由于水体对光线存在散射,无论是人工光源还是自然光源照射到水体时,都会在整个水域中形成水下光场<sup>[13-14]</sup>,其中处于目标和水下光电成像系统之间的水体散射将在成像系统靶面上形成背景干扰,降低目标对比度和成像质量。水下光电成像可分为主动和被动两种成像方式,水下主动光电成像利用系统自带的人工光源对水下目标进行照明,可以是卤素灯、LED灯或者蓝绿激光器等,水下被动光电成像利用自然光进行水下照明,包括太阳或者天空背景光等。可见光在水下传输时由于受到水体的强烈吸收和散射,其能量随距离增大按指数规律衰减,使得无论是被动还是主动方式,甚至近年来取得重要进展的水下激光成像技术<sup>[2-5]</sup>,其水下作用距离最多不过几十米。在另一个重要的水下应用领域,水下激光通信<sup>[15-16]</sup>中,水体的吸收和散射现象对通信距离和误码率同样会产生严重影响。

对水体散射等光学现象的研究可追溯到 20 世纪 60 年代,Duntley 深入研究了光线被海水吸收和散射的基本性质<sup>[17]</sup>;GROSSO 在理论建模和实验对比的基础上给出了体散射函数(VSF)与调制传递函数(MTF)的关系<sup>[18]</sup>;MERTENS 给出水体点扩展函数(PSF)和光束扩展函数(BSF)的定义,并研究了二者与水体的固有光学参数(IOP)之间的关系<sup>[19]</sup>;JAFFE 建立了水下成像的最优模型,发现调整光源和成像系统的相对位置能提升图像对比度<sup>[20]</sup>;HOU 建立了简单的水下成像模型,并研究了 PSF 在自然水体中成像的有效性,利用 PSF 对图像进行去卷积复原,获得了较好效果<sup>[21-22]</sup>;VOSS 给出了一个估算海水 PSF 的经验公式,可以用来预测任意长度水体的 PSF<sup>[23]</sup>。国内方面,陈养渭对水下激光散射场进行了实验研究,并建立了散射椭球模型<sup>[24]</sup>;闫旭光利用 Monte Carlo 方法分析了激光前向散射的时间和空间特

性<sup>[25]</sup>;宋庆君等研究了黄海、东海海区水体的后向散射系数与总悬浮物浓度的关系,为水色遥感提供了支撑<sup>[26]</sup>;李彩等对水体体散射函数的测量技术进展进行了综述<sup>[27]</sup>;许廷发等利用连续帧图像信息估算 PSF,结合凸集投影法进行超分辨率成像重建<sup>[28]</sup>;褚金奎等引入偏振技术,提出了一种抑制水下图像后向散射的方法<sup>[29]</sup>。

本文以水体吸收和散射的基本过程为基础,在稳定光源照射以及体散射函数为球形对称的情况下,定量求解光线经水体多次散射后形成的水下光场分布。求解水下光场的过程阐明了水体对光线吸收和散射的微观机制,精确的水下光场数据为严格推导水体 PSF 和 MTF 提供了关键信息。

## 2 水下光场计算模型

### 2.1 基本概念

一般认为,准直窄光束在水下传输时能量衰减遵循朗伯-比尔定律<sup>[13]</sup>,即

$$P = P_0 \cdot e^{-c \cdot r} = P_0 \cdot e^{-(a+b) \cdot r} \quad (1)$$

其中  $P_0$  为准直窄光束的初始功率,  $P$  为准直窄光束在水下传输距离  $r$  之后的功率,  $c$  为水体衰减系数,其倒数  $1/c$  称为衰减长度(Attenuation Length, AL),  $a$  为吸收系数,  $b$  为散射系数。

对于水下点光源,设光强为  $I_0$ ,则在水下传输距离  $r$  后未被吸收和散射的能量形成的径向照度为

$$E = \frac{I_0}{r^2} \cdot e^{-c \cdot r} = \frac{I_0}{r^2} \cdot e^{-(a+b) \cdot r} \quad (2)$$

多次散射:光束或光子在水下传输过程中被水分子或水中杂质散射从而多次改变传输方向的现象。

球面照度:空间中某点的球面照度为全空间范围内入射到该点处一个小球内的光通量总和与该小球的表面积之比,可表示为  $4\pi$  立体角范围内对亮度的积分。球面照度也称为标量照度。

水下初始光场:在指定的水域中,光源发射的

光能量进入水体传输过程中未被水体吸收和散射的部分在水下形成的球面照度分布。

水下散射光场: 在指定的水域中, 水体散射光形成的球面照度分布。

水下光场: 在指定的水域中, 水下初始光场与水下散射光场之和。

## 2.2 水下光场的形成过程

暂不考虑水气界面、水下物体等边界条件以及瞬态光源或光源功率波动的影响。假定在三维直角坐标系  $oxyz$  中充满了水体, 衰减系数、吸收系数与散射系数分别为  $c$ 、 $a$  和  $b$ , 其中  $b = 4\pi\beta$ , 式中  $\beta$  为体散射函数<sup>[13]</sup>。下面以单点光源为例说明水下光场的形成过程, 设在  $(x_0, y_0, z_0)$  处有光强为  $I_0$  的稳恒点光源  $S$ , 则水下光场按如下步骤形成:

I. 点光源发出的光线经扩散和水体衰减后形成水下初始光场  $E_{i0}$ 。

II. 水下初始光场  $E_{i0}$  使整个水域产生散射, 形成一次水下散射光场  $E_{s1}$ , 叠加在  $E_{i0}$  上形成一次水下光场  $E_{i1} = E_{i0} + E_{s1}$ 。

III. 一次水下光场  $E_{i1}$  使整个水域产生散射, 形成二次水下散射光场  $E_{s2}$ , 叠加在  $E_{i0}$  上形成二次水下光场  $E_{i2} = E_{i0} + E_{s2}$ 。

IV.  $i$  次水下光场  $E_{ii}$  使整个水域产生散射, 形成  $i+1$  次水下散射光场  $E_{s(i+1)}$ , 叠加在  $E_{i0}$  上形成  $i+1$  次水下光场  $E_{i(i+1)} = E_{i0} + E_{s(i+1)}$ 。

V. 以此类推, 将形成水下初始光场  $E_{i0}$  及水下光场序列  $E_{ii}, i = 1, 2, 3, \dots$ 。

VI.  $E_{ii}$  将收敛于水下光场  $E_i$ 。

根据以上思路, 下面给出一般意义上的水下光场求解方程式。

如图 1, 点光源  $S$  发出的光在水下传输过程中会进行球面扩散, 还会被水体吸收、散射, 一部分光线继续沿原来的路径传播, 在  $P$  点处形成的水下初始光场为

$$E_0(x, y, z) = \frac{I_0}{4 \cdot r^2} \cdot e^{-c \cdot r}, \quad (3)$$

式中  $r = \sqrt{(x_0 - x)^2 + (y_0 - y)^2 + (z_0 - z)^2}$ 。

由于受到光源照射, 水体也成为散射光源,  $M$  点处体积元  $dudvdw$  的散射会在  $P$  点处产生球面照度, 对所有体积元散射产生的球面照度进行叠加可得到  $P$  点处的水下散射光场  $E_s(x, y, z)$ 。

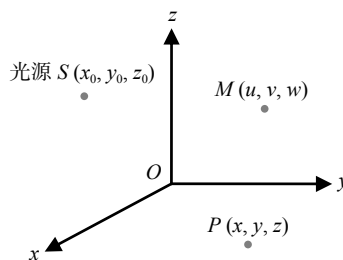


图 1 水下光场示意图

Fig. 1 Diagram of the underwater light field

设水下光场为  $E_i(x, y, z)$ , 则有

$$E_s(x, y, z) = \iiint_{-\infty}^{+\infty} \frac{\beta \cdot E_i(u, v, w) \cdot e^{-c \cdot l}}{l^2} \cdot dudvdw, \quad (4)$$

式中  $l = \sqrt{(x - u)^2 + (y - v)^2 + (z - w)^2}$ 。

$P$  点处的水下光场等于水下初始光场与水下散射光场之和, 因而有

$$E_i(x, y, z) = E_0(x, y, z) + E_s(x, y, z) = E_0(x, y, z) + \iiint_{-\infty}^{+\infty} \frac{\beta \cdot E_i(u, v, w) \cdot e^{-c \cdot l}}{l^2} \cdot dudvdw. \quad (5)$$

式(5)即为水下光场  $E_i(x, y, z)$  的求解方程式, 它属于第二类 Fredholm 积分方程, 且未知函数有 3 个变量。在满足一定条件时, 可利用行列式求解得到近似解析解<sup>[30]</sup>。本文从工程应用出发, 给出该类方程的数值迭代解法, 具体计算方法在 3.1 节中给出, 仅考虑水下光场含一个变量的情形, 对多个变量的情形可依此类推。

## 3 典型水下光场的计算方法

### 3.1 太阳照射下水下光场的计算方法

2.2 节给出了理想情况下水下光场的计算方法, 实际中总会存在一些边界条件, 下面给出太阳照射下足够大平静水面下的水下光场。

仅考虑太阳照度, 忽略天空背景亮度的影响, 太阳光以一定角度平行入射进入水中, 并发生反射和折射。折射光线经吸收和散射后, 剩下部分继续向前传播, 随深度增加能量越来越小。散射光线同样会被吸收、散射或者继续传播, 在水下形成多次散射, 进而形成稳定的水下光场。

如图 2 所示, 从对称性考虑, 太阳照射下的水下光场的数值仅仅与深度有关, 而与水平坐标无关, 因此, 水下光场函数可用深度  $h$  为自变量的一元函数  $E_i(h)$  表示。

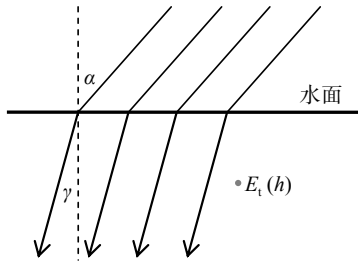


图 2 太阳照射下的水下光场  
Fig. 2 Underwater light field from the sun

设太阳光的入射角为 $\alpha$ ，水体的折射率为 $n_w$ ，由折射定律可求出折射角 $\gamma$ ，再由 Fresnel 公式<sup>[3]</sup>可求出入水时的反射率 $R_\alpha$ 和透射率 $T_\alpha$ 。

设与入射太阳光垂直方向上的照度为 $E_{\text{sun}}$ ，则水下深度  $h$  处的水下初始光场为

$$E_d(h) = \frac{E_{\text{sun}} \cdot T_\alpha \cdot \cos \alpha}{4 \cdot \cos \gamma} \cdot e^{-\frac{c \cdot h}{\cos \gamma}} \quad (6)$$

以图 3 来说明水下深度  $h$  处  $P$  点的水下光场  $E_t(h)$  的形成过程， $E_t(h) = E_d(h) + E_s(h)$ ， $E_d(h)$  为水下初始光场，表达式为式(6)， $E_s(h)$  为水下散射光场，在数值上等于水下所有微体积元散射在  $P$  点形成的球面照度之和。为此，建立直角坐标系，以  $P$  点正上方与水面相交点  $O$  为坐标原点，水平向右为  $x$  轴正向，垂直于纸面向外为  $y$  轴正向，竖直向下为  $z$  轴正向，则  $P$  点的坐标为  $P(0,0,h)$ 。

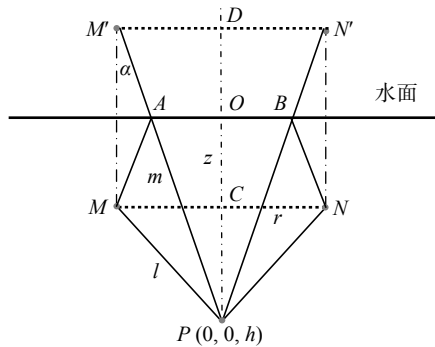


图 3 水下球面照度形成原理  
Fig. 3 Formation of underwater spherical illuminance

$PO$  与深度为  $z$  的水平面相交于  $C$ ，以  $C$  为圆心在水平面内画半径为  $r$  的圆  $C$ ， $MN$  为直径，其中  $M$  与  $M'$ 、 $N$  与  $N'$  分别关于水面对称， $PM'$  交水面于  $A$  点， $PN'$  交水面于  $B$  点，以  $M'N'$  为直径的水平圆的圆心为  $D$ ，由图 3 可知，在  $xOy$  平面内，以  $MN$  为直径的圆周上所有点到  $P$  点距离相等，记为  $l = \sqrt{(h-z)^2 + r^2}$ 。

圆  $C$  上的微体积元  $dV = 2\pi r \cdot dr dz$ ，体积元  $dV$  在  $P$  点形成的球面照度  $dE_{s1}$  为

$$dE_{s1} = \frac{2\pi r \beta \cdot E_t(z) \cdot dr dz \cdot e^{-c \cdot l}}{l^2} \quad (7)$$

还应考虑圆  $C$  上的微体积元散射光经水面下表面反射后对  $P$  点形成的球面照度。 $M$  点发出的光线经  $A$  点反射可到达  $P$ ，可等效为从  $M'$  发出的光线直接到达  $P$ 。同理， $N$  点发出的光线经  $B$  点反射也可到达  $P$ ，可等效为从  $N'$  发出的光线直接到达  $P$ ，故这组反射光线可等效从圆  $D$  发出，并经过了长度为  $PM'$  的水程到达  $P$  点，记为  $m = \sqrt{(h+z)^2 + r^2}$ 。

注意到光线  $MA$  在  $A$  点反射时有能量损失，由入射角  $\alpha$  根据 Fresnel 公式可计算出反射率  $R_\alpha$ 。由此可知圆  $C$  上的微体积元经水面下表面反射在  $P$  点形成的球面照度  $dE_{s2}$  为

$$dE_{s2} = \frac{2\pi r \beta \cdot E_t(z) \cdot R_\alpha \cdot dr dz \cdot e^{-c \cdot m}}{m^2} \quad (8)$$

综合以上结果，圆  $C$  上的微体积元在  $P$  点形成的球面照度  $dE_s$  为

$$dE_s = dE_{s1} + dE_{s2} = 2\pi r \beta \cdot E_t(z) \cdot \left( \frac{e^{-c \cdot l}}{l^2} + \frac{R_\alpha \cdot e^{-c \cdot m}}{m^2} \right) \cdot dr dz \quad (9)$$

其中  $R_\alpha$ 、 $l$ 、 $m$  均为  $h$ 、 $r$  和  $z$  的函数。

由此可知  $P$  点的水下散射光场  $E_s(h)$  为

$$E_s(h) = \iint_0^{+\infty} 2\pi r \beta \cdot E_t(z) \cdot \left( \frac{e^{-c \cdot l}}{l^2} + \frac{R_\alpha \cdot e^{-c \cdot m}}{m^2} \right) \cdot dr dz \quad (10)$$

故水下光场  $E_t(h)$  为

$$E_t(h) = \frac{E_{\text{sun}} \cdot T_\alpha \cdot \cos \alpha}{4 \cdot \cos \gamma} \cdot e^{-\frac{c \cdot h}{\cos \gamma}} + \iint_0^{+\infty} 2\pi r \beta \cdot E_t(z) \cdot \left( \frac{e^{-c \cdot l}}{l^2} + \frac{R_\alpha \cdot e^{-c \cdot m}}{m^2} \right) \cdot dr dz \quad (11)$$

式(11)为第二类 Fredholm 积分方程，对式(11)进行代换简化得到

$$E_t(h) = u(h) + \iint_0^{+\infty} K \cdot r \cdot E_t(z) \cdot (f(l(h,r,z)) + R_\alpha(h,r,z) \cdot f(m(h,r,z))) \cdot dr dz \quad (12)$$

其中

$$u(x) = \frac{E_{\text{sun}} \cdot T_\alpha \cdot \cos \alpha}{4 \cdot \cos \gamma} \cdot e^{-\frac{c \cdot x}{\cos \gamma}}, \quad K = 2\pi \beta, \quad f(x) = \frac{e^{-c \cdot x}}{x^2} \quad (13)$$



令深度  $h$  及积分变量  $r$  和  $z$  的细分间隔均为  $\Delta$ , 并对式(12)进行数值化得

$$E_t(k\Delta) = u(k\Delta) + \sum_{n_2=1}^{+\infty} \sum_{n_1=1}^{+\infty} Kn_1\Delta E_t(n_2\Delta) \cdot (f(l(k\Delta, n_1\Delta, n_2\Delta)) + R_\alpha(k\Delta, n_1\Delta, n_2\Delta) \cdot f(m(k\Delta, n_1\Delta, n_2\Delta))) \cdot \Delta^2, \quad (14)$$

其中,  $k = 1, 2, 3, \dots$ 。

由于水体对光线的衰减严重, 水体散射对距离超过 10 AL 的区域影响可以忽略, 因此在计算时, 可适当限定计算范围, 基本不影响计算精度, 例如计算 10 AL 深度内的水下光场时, 可令  $k = 1, 2, 3, \dots, N$ , 并满足  $N\Delta > 20$  AL。据此, 将式(14)改为以下迭代形式

$$E_{t,i+1}(k\Delta) = u(k\Delta) + \sum_{n_2=1}^N \sum_{n_1=1}^N Kn_1\Delta E_{t,i}(n_2\Delta) \cdot (f(l(k\Delta, n_1\Delta, n_2\Delta)) + R_\alpha(k\Delta, n_1\Delta, n_2\Delta) \cdot f(m(k\Delta, n_1\Delta, n_2\Delta))) \cdot \Delta^2. \quad (15)$$

式(15)的迭代求解流程图如图 4 所示。

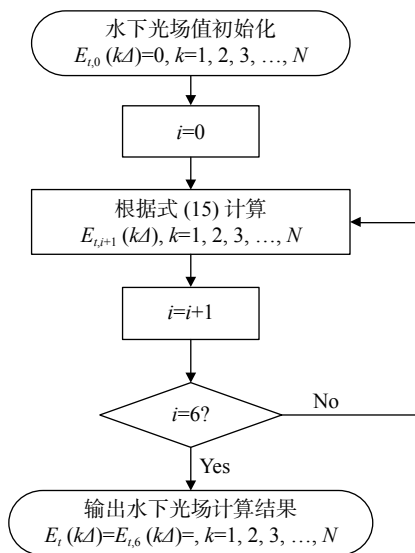


图 4 水下光场迭代求解流程图

Fig. 4 Iterative solution flow chart of the underwater light field

迭代 6 次后  $E_t(k\Delta)$  已基本收敛, 可输出结果。下面利用 Matlab 仿真程序迭代计算太阳照射下的水下光场, 选取晴朗天气、洁净海水条件下的水下光场进行计算, 可以从仿真曲线直观看出这一典型条件下的水下光场随深度的变化情况。

仿真程序的相关参数取值如下: 太阳光照度:  $E_{\text{sun}} = 10^5$  lx; 太阳光入射角:  $\alpha = 45^\circ$ ; 水体折射率:  $n_w = 1.33$ ; 衰减系数:  $c = 0.1$  /m; 吸收系数:  $a = 0.05$  /m; 散射系数:  $b = 0.05$  /m; 体散射函数:  $\beta = 1/80 \pi / (m \cdot s_r)$ ;  $E_t(h)$  深度精度:  $\Delta = 0.2$  m;

$\Delta$  取值的依据是, 当  $\Delta = 0.02$  AL 时, 水下光场精度足够, 此例中 AL = 10 m, 因而  $\Delta = 0.2$  m。

图 5 是水深 100 m (10 AL) 以内仿真程序输出的水下光场迭代曲线。

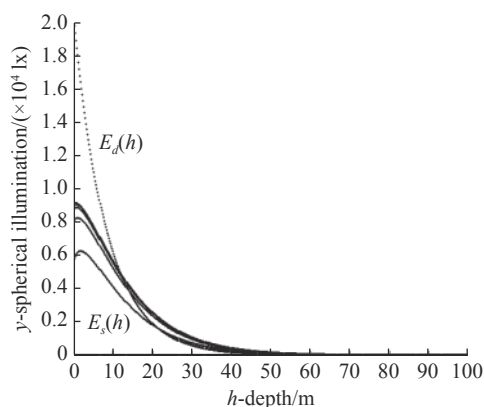


图 5 太阳照射下水下光场迭代曲线

Fig. 5 Iteration curves of the underwater light field from the sun

由于  $E_t(h) = E_d(h) + E_s(h)$ , 为了直观表达, 不直接显示  $E_t(h)$ , 而显示分量  $E_d(h)$  和  $E_s(h)$ , 其中  $E_d(h)$  是定值, 在  $i$  从 0 到 5 这 6 次迭代过程中保持不变, 而  $E_s(h)$  在迭代过程中逐渐收敛。图 6 最上面的曲线为  $E_d(h)$ , 下面 6 条曲线为  $E_s(h)$  的 6 次迭代变化 (包括  $E_s(h) = 0$ ), 顺序为从下至上, 从图 6 中可以看出 6 次迭代后已基本收敛。

### 3.2 均匀亮度天空背景下的水下初始光场

由 3.1 节对水下光场的求解过程可知, 当光源选定为均匀亮度天空背景时, 计算过程中唯一差别是求解水下初始光场  $E_d(h)$ , 在不同的光源照射下, 只要求出了  $E_d(h)$ , 则可利用上述方法得到迭代方程式对水下光场  $E_t(h)$  进行求解。下面推导均匀亮度天空背景下的  $E_d(h)$  表达式, 并给出 Matlab 程序的仿真结果。

由于天空背景为大型面光源, 各部分光线入水时的入射角  $\alpha$  各不相同, 因此, 求解  $E_d(h)$  时需对上半球天空背景进行积分。

如图 6 所示, 天顶角为  $\alpha$  的微球带对应的立体角为  $d\Omega = 2\pi \sin \alpha d\alpha$ 。

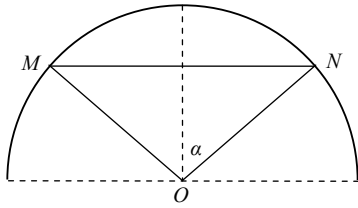


图 6 天空背景在水面形成照度

Fig. 6 Illuminance on the surface with the sky as the background

设均匀天空的亮度为 $L_{\text{sky}}$ ,对水下初始光场求解时,可将微球带发出的光线等效为入射角为 $\alpha$ 的一组平行光,而且垂直于入射方向上的照度为 $dE = 2L_{\text{sky}}\pi\sin\alpha d\alpha$ ,则可得均匀亮度天空背景下水下初始光场为

$$E_d(h) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{L_{\text{sky}}\pi\sin(2\alpha) \cdot T_\alpha \cdot e^{-\frac{c \cdot h}{\cos\alpha}}}{4\cos\alpha} \cdot d\alpha \quad (16)$$

编写 Matlab 仿真程序计算 $E_t(h)$ ,假设天空亮度为 $L_{\text{sky}} = 5\,000 \text{ cd/m}^2$ ,水体光学参数及 $E_t(h)$ 的深度精度同 3.1 节,则 $E_t(h)$ 在深度 10 AL 之内的迭代曲线如图 7 所示。其中各曲线的意义与图 5 相同。

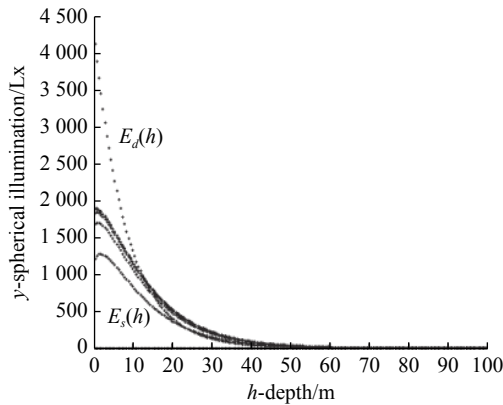


图 7 天空背景照射下水下光场迭代曲线

Fig. 7 Iteration curves of the underwater light field with the sky as the background

### 3.3 点光源形成的水下初始光场

#### 3.3.1 点光源在水面以下

设水深 $h_0$ 处有均匀发光点光源 $S$ ,光强为 $I_0$ ,水体衰减系数、吸收系数及散射系数同上,计算水面平静时光源 $S$ 形成的水下初始光场。

如图 8 所示,由于对称性,仅分析通过 $S$ 点的一个竖直平面内的情形,对于水下任意点 $P$ ,设其深度为 $h$ ,离 $S$ 点的水平距离为 $x$ ,则 $P$ 点处的水下初始光场记为 $E_d(h,x)$ 。

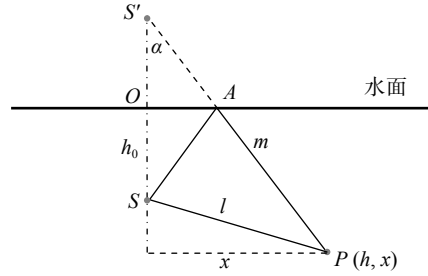


图 8 水下点光源形成的水下初始光场

Fig. 8 Underwater initial light field by an underwater point light source

光源 $S$ 直射到 $P$ 点处的球面照度为 $E_{d1}(h,x)$ ,光源 $S$ 点发出的光线经水面下表面反射后照射到 $P$ 点处的球面照度为 $E_{d2}(h,x)$ ,则

$$E_{d1}(h,x) = \frac{I_0}{4 \cdot l^2} \cdot e^{-c \cdot l} \quad (17)$$

其中 $l = \sqrt{(h_0 - h)^2 + x^2}$ 。

$S$ 点发出的光线经水面下表面反射的光线可以等效为 $S$ 点关于水面的对称点 $S'$ 点发出,经过了水程 $S'P$ 的衰减以及反射率 $R_\alpha$ 的修正,则

$$E_{d2}(h,x) = \frac{I_0}{4 \cdot m^2} \cdot R_\alpha \cdot e^{-c \cdot m} \quad (18)$$

其中 $m = \sqrt{(h_0 + h)^2 + x^2}$ ,最后可得

$$E_d(h,x) = E_{d1}(h,x) + E_{d2}(h,x) \quad (19)$$

#### 3.3.2 点光源在水面以上

设水面以上高 $h_0$ 处有均匀发光点光源 $S$ ,光强为 $I_0$ ,水体衰减系数、吸收系数及散射系数同上,下面计算水面平静时光源 $S$ 形成的水下初始光场。

如图 9 所示,通过 $S$ 作竖直线与水面交于 $O$ 点,显然,水下初始光场关于直线 $SO$ 旋转对称,因此只分析通过 $S$ 点的竖直平面内的情形。对于水下任意点 $P$ ,设其深度为 $h$ ,离 $O$ 点的水平距离为 $x$ ,则 $P$ 点处的水下初始光场值记为 $E_d(h,x)$ 。 $SO$ 与深度为 $h$ 的水平面交于 $M$ ,则以 $M$ 为圆心, $x$ 为半径的水平圆上的水下初始光场值均为 $E_d(h,x)$ 。

光源 $S$ 发出的光线中入射角为 $\alpha$ 的光线形成一个锥角为 $2\alpha$ 的圆锥面,其水面入射点集合是圆,圆心为 $O$ ,直径为 $AB$ ,设折射角为 $\gamma$ ,透射率为 $T_\alpha$ 。

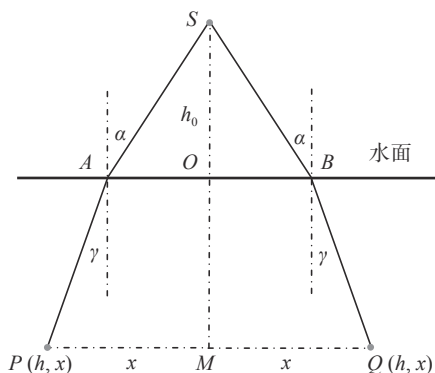


图9 水上点光源形成的水下初始光场

Fig. 9 Underwater initial light field by an overwater point light source

锥角为 $2\alpha$ 的圆锥立体角为 $2\pi(1 - \cos \alpha)$ , 考虑圆锥 $2(\alpha + d\alpha)$ 与 $2\alpha$ 之间的光线折射入水能量传输情况, 其入射角均为 $\alpha$ , 透射率均为 $T_\alpha$ , 立体角为 $2\pi \sin \alpha \cdot d\alpha$ , 对应能量为 $\Phi_0 = 2\pi I_0 \sin \alpha \cdot d\alpha$ , 该能量经水面反射和水体衰减后到达深度 $h$ 处时变为

$$\Phi_h = \Phi_0 \cdot T_\alpha \cdot e^{-\frac{c \cdot h}{\cos \gamma}} \quad (20)$$

由图9可知 $x = h_0 \cdot \tan \alpha + h \cdot \tan \gamma$ , 在深度 $h$ 处, 折射光线是一个圆环, 内半径为 $x$ , 外半径为 $x + dx$ , 其面积 $ds = 2\pi x \cdot dx$ 。由于 $P$ 处的球面照度为 $E_d(h, x)$ , 则 $\Phi_h$ 又可表示为

$$\Phi_h = 4E_d(h, x) \cdot \cos \gamma \cdot ds \quad (21)$$

比较式(20)和式(21)并化简得

$$E_d(h, x) = \frac{I_0 \sin \alpha \cdot T_\alpha \cdot e^{-\frac{c \cdot h}{\cos \gamma}}}{4 \cos \gamma \cdot x \cdot \left( \frac{h_0}{\cos^2 \alpha} + \frac{h \cdot \cos \alpha}{n_w \cdot \cos^3 \gamma} \right)} \quad (22)$$

### 3.4 小结

以上3小节分别给出了平行光、天球光、水下和水上点光源形成的水下光场的计算方法, 并考虑到水面下表面反射的影响。假定光线的传输及散射现象具有独立性和叠加性, 则在以上各类光源的任意组合下求解水下光场也是可行的。在复色光入射的情况下, 也可以对各个波段分别计

### 参考文献:

- [1] KOCAK D M, DALGLEISH F R, CAIMI F M, et al.. A focus on recent developments and trends in underwater imaging[J]. *Marine Technology Society Journal*, 2008, 42(1): 52-67.

算然后进行积分得到结果。这些光源的选取具有一定的代表性, 因此, 利用该计算模型可解决一般意义上的水下光场分布问题。

在自带光源的主动水下光电成像应用中, 为了提高功率密度和减小后向散射, 光源的照明区域往往局限在有限的角度范围内, 这时水下光场也可以通过上述方法求解, 因此该计算模型可扩展应用到边界条件更为复杂一些的情形。

已知水下光场分布, 则易求得水体的表观光学参数<sup>[13]</sup>, 因此, 该计算模型还可直接用于求解水体的表观光学参数(AOP)。

## 4 结 论

水下光电成像技术目前得到了广泛的关注, 在未来具有可观的经济和军事价值。近年来军事方面的一个紧迫需求是水下对空跨介质成像<sup>[32]</sup>, 由此水下航行器得以在安全深度下对空中威胁目标进行预警。其主要难点在于: 一是海面波浪引起的图像碎化问题<sup>[33-34]</sup>; 二是水体对光线的吸收和散射效应引起的图像模糊。这需要研究水下光场分布, 改善图像质量, 以提升水下航行器的预警深度。

从基本的吸收和散射模型出发, 考虑到有无边界条件, 从理论上严格推导了几种典型光源照射下的水下光场分布, 这对于分析水体 PSF 以及 MTF 具有重要意义, 也为研究水下光电图像的退化模型奠定了基础。虽然只给出了水体 VSF 为球形对称且水面平静情形下水下光场的求解方法, 但对于 VSF 具有任意形式、水面波形具有一阶连续可导的情形也能求解, 这为一般意义上水下光场问题的定量求解提供了借鉴。

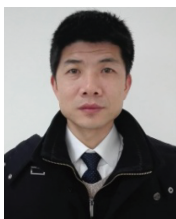
然而, 在实际问题中, 光源特性并不稳定, 水体散射特性在空间上也不均匀, 且存在湍流时变扰动<sup>[35-37]</sup>, 故水下光场是动态变化的, 且水下各种噪声也对计算结果有较大影响。因此, 在具体的水下光场求解过程中, 需要结合估计、现场测量、大数据处理等经验方法进行分析, 而将本文的方法作为必要的参考。



- [2] DALGLEISH F R, VUORENKOSKI A K, OUYANG B. Extended-range undersea laser imaging: current research status and a glimpse at future technologies[J]. *Marine Technology Society Journal*, 2013, 47(5): 128-147.
- [3] JAFFE J S. Underwater optical imaging: the past, the present, and the prospects[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2015, 40(3): 683-700.
- [4] 曹峰梅, 金伟其, 黄有为, 等. 水下光电成像技术与装备研究进展(上)——水下激光距离选通技术[J]. *红外技术*, 2011, 33(2): 63-69.  
CAO F M, JIN W Q, HUANG Y W, *et al.*. Review of underwater opto-electrical imaging technology and equipment (I)—underwater laser range-gated imaging technology[J]. *Infrared Technology*, 2011, 33(2): 63-69. (in Chinese)
- [5] 金伟其, 王霞, 曹峰梅, 等. 水下光电成像技术与装备研究进展(下)[J]. *红外技术*, 2011, 33(3): 125-132.  
JIN W Q, WANG X, CAO F M, *et al.*. Review of underwater opto-electrical imaging technology and equipment (II)[J]. *Infrared Technology*, 2011, 33(3): 125-132. (in Chinese)
- [6] 梅风华, 李超, 张玉鑫. 光谱成像技术在海域目标探测中的应用[J]. *中国光学*, 2017, 10(6): 708-718.  
MEI F H, LI CH, ZHANG Y X. Application of spectral imaging technology in maritime target detection[J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(6): 708-718. (in Chinese)
- [7] 全向前, 陈祥子, 全永前, 等. 深海光学照明与成像系统分析及进展[J]. *中国光学*, 2018, 11(2): 153-165.  
QUAN X Q, CHEN X Z, QUAN Y Q, *et al.*. Analysis and research progress of deep-sea optical illumination and imaging system[J]. *Chinese Optics*, 2018, 11(2): 153-165. (in Chinese)
- [8] 胡浩丰, 李校博, 刘铁根. 基于偏振成像的水下图像复原技术研究最新进展[J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(6): 0603006.  
HU H F, LI X B, LIU T G. Recent advances in underwater image restoration technique based on polarimetric imaging[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(6): 0603006. (in Chinese)
- [9] 李庆忠, 白文秀, 牛炯. 基于改进CycleGAN的水下图像颜色校正与增强[J]. *自动化学报*, 2020(2020-12-04).  
LI Q ZH, BAI W X, NIU J. Underwater image color correction and enhancement based on improved cycle-consistent generative adversarial networks[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2020(2020-12-04).
- [10] 王新伟, 孙亮, 王敏敏, 等. 水下二维及三维距离选通成像去噪技术研究[J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(2): 0203002.  
WANG X W, SUN L, WANG M M, *et al.*. Deblurring methods for underwater 2D and 3D range-gated imaging[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(2): 0203002. (in Chinese)
- [11] 刘群, 刘崇, 朱小磊, 等. 星载海洋激光雷达最佳工作波长分析[J]. *中国光学*, 2020, 13(1): 148-155.  
LIU Q, LIU CH, ZHU X L, *et al.*. Analysis of the optimal operating wavelength of spaceborne oceanic Lidar[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(1): 148-155. (in Chinese)
- [12] 曲锐, 杨建峰, 曹剑中, 等. 水下大视场连续变焦光学系统设计[J]. *红外与激光工程*, 2021, 50(7): 20200468.  
QU R, YANG J F, CAO J ZH, *et al.*. Design of underwater large field of view zoom optical system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(7): 20200468. (in Chinese)
- [13] MOBLEY C D. *Light and Water: Radiative Transfer in Natural Waters*[M]. San Diego: Academic Press, 1994.
- [14] JERLOV N G. *Marine Optics*[M]. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company, 1976.
- [15] 董冰, 佟首峰, 张鹏, 等. 20 m水下无线蓝光LED通信系统样机设计[J]. *中国光学*, 2021, 14(6): 1451-1458.  
DONG B, TONG SH F, ZHANG P, *et al.*. Design of a 20 m underwater wireless optical communication system based on blue LED[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(6): 1451-1458. (in Chinese)
- [16] YANG X Q, TONG ZH J, DAI Y ZH, *et al.*. 100 m full-duplex underwater wireless optical communication based on blue and green lasers and high sensitivity detectors[J]. *Optics Communications*, 2021, 498: 127261.
- [17] DUNTLEY S Q. Light in the sea[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1963, 53(2): 214-233.
- [18] DEL GROSSO V. Modulation transfer function of water[C]. *OCEAN 75 Conference, IEEE*, 1975: 331-347.
- [19] MERTENS L E, REPLOGLE F S JR. Use of point spread and beam spread functions for analysis of imaging systems in water[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1977, 67(8): 1105-1117.
- [20] JAFFE J S. Computer modeling and the design of optimal underwater imaging systems[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 1990, 15(2): 101-111.
- [21] HOU W L, GRAY D J, WEIDEMANN A D, *et al.*. Comparison and validation of point spread models for imaging in natural waters[J]. *Optics Express*, 2008, 16(13): 9958-9965.

- [22] HOU W L. A simple underwater imaging model[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(17): 2688-2690.
- [23] VOSS K J. Simple empirical model of the oceanic point spread function[J]. *Applied Optics*, 1991, 30(18): 2647-2651.
- [24] 陈养涓. 水下激光散射场的实验研究[J]. *舰船科学技术*, 1996(2): 44-48.  
CHEN Y W. Experimental study on underwater laser scattering field[J]. *Ship Science and Technology*, 1996(2): 44-48. (in Chinese)
- [25] 闫旭光, 彭复员, 徐国华, 等. 海水介质中激光前向散射的空间时间特性分析[J]. *激光技术*, 2005, 29(3): 266-269.  
YAN X G, PENG F Y, XU G H, *et al.*. Analysis of temporal and frequency characteristics of fore-scattered laser in ocean channel[J]. *Laser Technology*, 2005, 29(3): 266-269. (in Chinese)
- [26] 宋庆君, 唐军武. 黄海、东海海区水体散射特性研究[J]. *海洋学报*, 2006, 28(4): 56-63.  
SONG Q J, TANG J W. The study on the scattering properties in the Huanghai sea and east China sea[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2006, 28(4): 56-63. (in Chinese)
- [27] 李彩, 曹文熙, 柯天存, 等. 水体体散射函数测量技术研究进展[J]. *热带海洋学报*, 2013, 32(5): 65-72.  
LI C, CAO W X, KE T C, *et al.*. Progress in measurement techniques of volume scattering function of the ocean[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2013, 32(5): 65-72. (in Chinese)
- [28] 许廷发, 罗璇, 苏畅, 等. 多帧距离选通图像点扩散函数估计的超分辨率重建[J]. *中国光学*, 2016, 9(2): 226-233.  
XU T F, LUO X, SU CH, *et al.*. Super-resolution reconstruction of multiframed laser range-gated image by the estimate of point-spread function[J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(2): 226-233. (in Chinese)
- [29] 褚金奎, 张培奇, 成昊远, 等. 基于特定偏振态成像的水下图像去散射方法[J]. *光学精密工程*, 2021, 29(5): 1207-1215.  
CHU J K, ZHANG P Q, CHENG H Y, *et al.*. De-scattering method of underwater image based on imaging of specific polarization state[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2021, 29(5): 1207-1215. (in Chinese)
- [30] 王元, 文兰, 陈木法. *数学大辞典*[M]. 北京: 科学出版社, 2010.  
WANG Y, WEN L, CHEN M F. *Dictionary of Mathematics*[M]. Beijing: Science Press, 2010. (in Chinese)
- [31] 张以谟. *应用光学*[M]. 3版. 北京: 电子工业出版社, 2008.  
ZHANG Y M. *Applied Optics*[M]. 3rd ed. Beijing: Electronics Industry Press, 2008. (in Chinese)
- [32] POTTER R E. Observations from below a rough water surface to determine conditions of or above the surface waves: US, 5528493[P]. 1996.
- [33] 何大华, 李俊瑶. 水下对太阳成像估算海况的新方法[J]. *光学与光电技术*, 2019, 17(1): 11-15.  
HE D H, LI J Y. A new method for estimating sea state by underwater solar imaging[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2019, 17(1): 11-15. (in Chinese)
- [34] 何大华, 李苏, 李亚鹏. 反向追迹法获取水下对空全景图像[J]. *应用光学*, 2020, 41(5): 929-937.  
HE D H, LI S, LI Y P. Obtaining water-to-air panoramic images by inverse ray tracing method[J]. *Journal of Applied Optics*, 2020, 41(5): 929-937. (in Chinese)
- [35] 卢腾飞, 张凯宁, 吴志军, 等. 椭圆涡旋光束在海洋湍流中的传输特性[J]. *中国光学*, 2020, 13(2): 323-332.  
LU T F, ZHANG K N, WU ZH J, *et al.*. Propagation properties of elliptical vortex beams in turbulent ocean[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(2): 323-332. (in Chinese)
- [36] 蒲欢, 季小玲. 海洋湍流中光学成像相关问题研究[J]. *光学学报*, 2016, 36(10): 1026014.  
PU H, JI X L. Problems of optical imaging in oceanic turbulence[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(10): 1026014. (in Chinese)
- [37] WU C S, KO J, DAVIS C C. Imaging through water turbulence with a plenoptic sensor[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9979: 99790Z.

#### 作者简介:



何大华(1973—), 男, 湖北武汉人, 博士, 高级工程师, 1995年于上海交通大学获得学士学位, 2000年于华中理工大学获得硕士学位, 2005年于华中科技大学获得博士学位, 主要从事水下光电成像及图像处理方面的研究。E-mail: 470444534@qq.com