

水体MTF的推导

何大华 许东阳 方珍

Derivation of water MTF

HE Da-hua, XU Dong-yang, FANG Zhen

引用本文:

何大华, 许东阳, 方珍. 水体MTF的推导[J]. 中国光学, 优先发表. doi: 10.37188/CO.2026-0010

HE Da-hua, XU Dong-yang, FANG Zhen. Derivation of water MTF[J]. *Chinese Optics*, In press. doi: 10.37188/CO.2026-0010

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2026-0010>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

鬼像影响下的调制传递函数计算模型

An MTF calculation model under the influence of ghost images

中国光学 (中英文). 2024, 17(5): 1183 <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0121>

正弦型中频面形误差对光学传递函数的影响

Effects of sinusoidal mid-spatial frequency surface errors on optical transfer function

中国光学 (中英文). 2024, 17(4): 725 <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0229>

偏振光在椭球细粒子中多次散射传输特性

Multiple scattering transmission characteristic of polarized light in ellipsoidal fine particles

中国光学 (中英文). 2023, 16(2): 348 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0144>

基于哈特曼探测器的光学传递函数测量方法研究

Optical transfer function measurement based on Hartmann wavefront sensor

中国光学 (中英文). 2025, 18(4): 819 <https://doi.org/10.37188/CO.2025-0012>

基于大气多次散射的波浪水下偏振模式研究

The polarization mode of underwater waves based on atmospheric multiple scattering

中国光学 (中英文). 2023, 16(6): 1324 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0223>

折反式变形光学系统偏振像差分析及其对点扩散函数的影响

Polarization aberration analysis of catadioptric anamorphic optical systems and its effect on the point spread function

中国光学 (中英文). 2024, 17(6): 1408 <https://doi.org/10.37188/CO.2024-0010>

文章编号 2097-1842(xxxx)x-0001-08

水体 MTF 的推导

何大华*, 许东阳, 方 珍

(华中光电技术研究所-武汉光电国家研究中心 武汉 430223)

摘要: 水体对光线的多次散射会形成水下光场, 水下光场的存在使水下光电成像质量显著恶化, 为了对水下光电图像质量退化进行定量分析, 需要研究水下光场分布, 建立严格的水下图像传输模型。假定水体体散射函数为球形对称, 首先计算出理想点光源的水下光场分布, 然后通过沿路径的亮度积分得到水体点扩展函数, 最后借助于球谐函数与球面卷积等数学工具推导出球面空间中的水体调制传递函数。在已知水体固有光学参数的条件下, 给出了水体调制传递函数以及对对比度极限因子的图象。该算法模型解决了球形体散射函数条件下的水体调制传递函数推导问题, 为解决非球形体散射函数及动态光场条件下水体调制传递函数的推导问题奠定了基础。

关键词: 水下成像; 多次散射; 水下光场; 衰减长度; 点扩展函数; 调制传递函数; 对比度极限因子

中图分类号: P733.3 文献标志码: A doi: 10.37188/CO.2026-0010 CSTR: 32171.14.CO.2026-0010

Derivation of water MTF

HE Da-hua*, XU Dong-yang, FANG Zhen

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

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

Abstract: The quality of underwater imaging significantly deteriorates due to underwater light field which caused by multiple scattering of water. In order to quantitatively analyze the quality degradation of underwater image, it is necessary to study the distribution of underwater light field and establish a strict underwater image transmission model. Assuming that water VSF is spherical symmetry, underwater light field distribution formed by an ideal point light source is calculated, and then water PSF is obtained by brightness integral along the path. Finally, water MTF in the spherical space is derived by means of mathematical tools such as spherical harmonic function and spherical convolution. Under the condition that the intrinsic optical parameters of water are known, curves of water MTF and contrast limit factor are presented. The algorithm model solves the derivation of water MTF under the condition of spherical water VSF, and this lays a foundation for the derivation of water MTF under the condition of non spherical water VSF and dynamic light field.

Key words: underwater imaging; multiple scattering; underwater light field; attenuation length; point spread function; modulated transfer function; contrast limit factor

收稿日期: 2026-01-24; 修订日期: xxxx-xx-xx

基金项目: 船舶重工装备预研联合基金 (No. 6141B042006)

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

1 引言

水体对光线的吸收和散射强度比大气高出几个数量级,在水中光能量随距离呈指数衰减,即使是清洁均匀的水体,由于多次散射,水体背景中会形成强烈的散射光场,导致图像的对比度和分辨率大幅降低。海水中溶解了各种电解质、黄色物质,悬浮着各种生物物质、矿物质,甚至泥沙、无机粗颗粒、海雪等,还存在温跃层、密度起伏、湍流等非均匀现象,这严重影响了光线在水下的传输过程,使水体对光线的吸收和散射呈现出时间上和空间上的非均匀性,带来大量成像噪声,增加了水下光电成像的难度。在良好的自然光照明下,水下被动光电成像的作用距离通常只有十几米,即使是采用特殊成像体制的激光水下成像系统,作用距离通常也不过数十米^[1-7]。水体对光线吸收和散射规律极其复杂,尽管目前已提出多种水下图像传输模型,但大多是经验模型,普适性有限,急待建立一种可从最基本的假设推导出来的水下图像传输模型。

水下光电成像作用距离有时可通过提高照明光源功率或探测器灵敏度得到一定程度的提升,但并非总能如此,提高照明光源功率有时反而会降低水下图像质量。影响水下成像质量的主要因素是海水的强烈散射,海水散射随光源功率增大而增大,使图像质量产生退化,即使光源能量和探测灵敏度均足够,也可能因为对比度太低以及噪声而丢失目标信息。为了弄清水体散射对水下成像质量的影响,人们提出了体散射函数 VSF(Volumn scattering function)、点扩展函数 PSF(Point spread function)、光束扩展函数 BSF(Beam spread function)等概念,区分了瑞利散射和米氏散射两类重要的散射类型,并研究了水体调制传递函数 MTF(Modulated transfer function)与这些参数之间的关系。WELLS 和 JAFFE 研究了小角度前向散射对目标分辨率的影响^[8-10],MERTENS 等给出了 PSF 及 BSF 的定义以及现场测量方法,由 PSF 的傅立叶-贝塞尔变换定义了水体 MTF,并进一步对 PSF 进行了测量和建模^[11-15],HOU 等对水体 MTF 进行了深入研究和仿真,并利用实验及理论推导的方法给出了 MTF 的

表达式^[16-19],MCGLAMERY 等建立了多种水下成像模型,并分析了水下成像性能极限^[20-23]。国内,李彩等对水体 VSF 的测量技术进展进行了综述,并研究了水体散射函数测量仪^[24-26],于亦凡等利用图像传输方法得到了一维和二维的海水点扩展函数曲线^[27],刘智深等运用 Fourier 光学方法研究海洋辐射传递,完成了小角度长距离条件下海水 MTF 的测量^[28],何大华等给出了自然条件下水下光场的计算方法并建立了一种水下光电成像模型^[29-31],黄有为、闫旭光等分析了前后向散射的时空特性^[32-33],刘雪明、赵璞分别研究了激光成像系统及被动光电成像系统的 MTF^[34-35],孙立颖、蒲欢等研究了湍流对水体 MTF 的定量影响^[36-37]。

本文假定目标为全向散射体,且水体 VSF 为球形对称,建立一种对称的理想水下光电成像模型,从水体 VSF 出发,通过数学推导和数值仿真获取点光源的水下光场分布,并推导出球面空间中一定长度水体的 PSF 和 MTF。

2 理想水下光电成像模型

水下光电成像系统的 MTF 应为水体 MTF、光学系统 MTF 以及探测器 MTF 三者的乘积,本文仅讨论水体 MTF,它是影响水下成像质量的决定因素。忽略水下光电成像系统的具体形式,以下给出一种理想的水下光电成像模型。

如图 1,待成像的物体处于半径为 r 的球面上,称为物球面,以球心 O 处为视点,考虑了水体吸收和散射效应后的 4π 球面角内的亮度分布称为物球面的像。由此可见,该模型是一个理想的概念模型,无须光学系统和探测器,成像视场为 4π 球面角,具有全向成像能力。

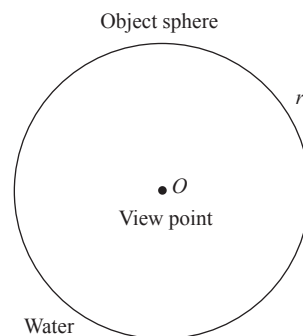


图 1 理想水下光电成像模型

Fig. 1 Ideal underwater optoelectronic imaging model

根据以上描述, 可知该成像模型是基于几何光学的成像模型, 目标图像发生退化的原因是光线被水体吸收和散射, 且该模型呈球形对称, 具有等晕成像特性, 故具有统一的 PSF 和 MTF, 它们与水体路径的长度 r 及吸收和散射系数有关。

在理想水下光电成像模型中, 假设物球面上有一个理想点光源, 则该点光源将在水下形成光场, 从球心 O 处观察可得一个 4π 球面度的亮度分布图, 该亮度分布图可看作是理想成像系统的二维球面 PSF, 其定义域为 4π 球面角。

在下面的论述中, 先给出理想点光源形成的水下光场, 并在球面空间中计算出长度为 r 的水体 PSF, 然后推导出水体 MTF。

3 水体 MTF 的推导过程

3.1 理想点光源形成的水下光场

基于理想水下光电成像模型, 将理想点光源放置在半径为 r 的物球面上, 所成的几何像即为以球心 O 为视点的 4π 空间亮度分布, 它是成像系统的脉冲响应, 也就是长度为 r 的水体 PSF。首先求得理想点光源形成的水下光场分布, 在此基础上可推导出水体 PSF 和 MTF。

设全向点光源发出的光波长为 532nm , 光强为 1cd , 则光功率为 $4\pi\text{W}$, 对应于该波长的水体衰减系数 $c = 0.1/\text{m}$, 散射系数 $b = 0.05/\text{m}$, 吸收系数 $a = 0.05/\text{m}$ 。取距离精度为 0.01 米, 参照文献 [30] 利用 Monte Carlo 法计算水下光场随距离变化的曲线如下, 其中横坐标为距离, 纵坐标为水下标量光场 E_s , 采用对数坐标。水体衰减长度为 $1/c$, 指准直光束在水下传输时能量降低至初始值 $1/e$ 时通过的距离。

图 2 中曲线为距离精度为 0.01 米时点光源水体散射形成的水下光场图象, 也就是说在点光源周边水域里存在标量照度, 由于任何水体体积元在受到光照后均会发生散射, 从而产生一定的亮度, 因此在水下某点处朝任何方向观察, 均存在水体散射亮度背景, 它是水下成像的主要干扰源。

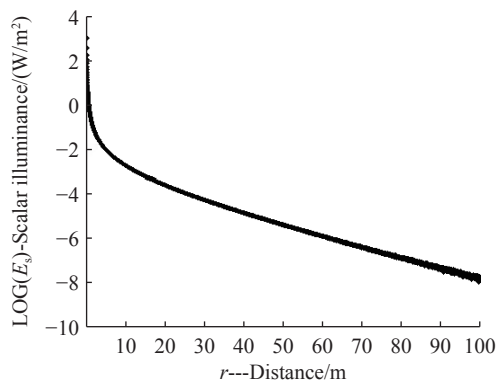


图 2 点光源形成的水下光场($c=0.1/\text{m}$, $b=0.05/\text{m}$)

Fig. 2 Underwater light field formed by point light source ($c=0.1/\text{m}$, $b=0.05/\text{m}$)

3.2 水体 PSF 推导

根据点光源的水下光场可以仿真计算出水体 PSF, 依据图 1 所示的理想水下光电成像模型, 求解水体 PSF 的过程如下。

如图 3, 设水下 P 点处有单位强度的理想点光源, 它处在物球面上, 所产生的水下光场为 $E_s(d)$, d 为到点光源的距离, O 点为视点, 离 P 点距离的为 r , 在 4π 球面角范围内的亮度分布即为水体 PSF。定义观察方向 OA 与 OP 夹角 θ 为极角, 那么极角 θ 方向上由于水体散射产生的亮度 $L(\theta)$ 为路径 OA 方向上所有微体积元散射视亮度的积分

$$L(\theta) = \int_0^{+\infty} 4\beta E_s(d) \cdot e^{-c \cdot t} dt, \quad (1)$$

式中 β 为体散射函数, 本文假定水体 VSF 为球形对称, 故 $\beta = \frac{b}{4\pi}$, b 为水体散射系数, 图中 $OP = r$, $OA = t$, $d = PA = \sqrt{r^2 + t^2 - 2rt\cos\theta}$ 。

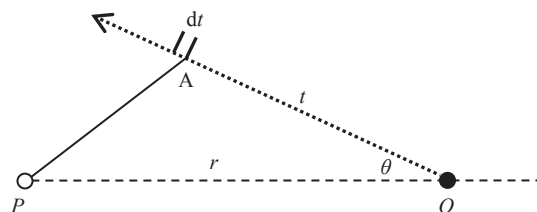


图 3 水体 PSF 求解原理图

Fig. 3 Schematic diagram for solving water PSF

计算水体 PSF 时令距离精度为 0.01 米, $c=0.1/\text{m}$, $b=0.05/\text{m}$ 时, 利用 Matlab 程序绘制 $r=20$ m 时 O 点处的水体 PSF 如图 4, 纵坐标 L 为

O 点沿极角方向的亮度,采用对数坐标,横坐标 θ 为极角,角度单位为 $\pi/5000$,因此横坐标 0-5000 对应极角范围为 $(0,\pi)$,AL(attenuation length) 指衰减长度。

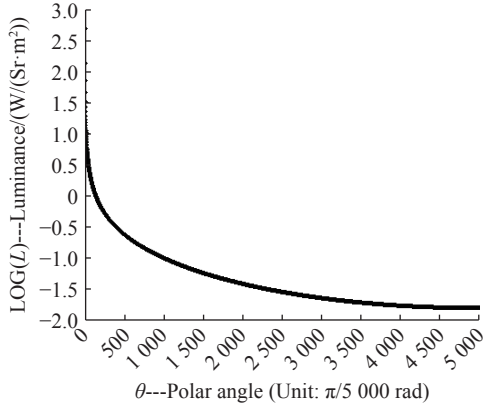


图4 在 2AL 处的水体 PSF($c=0.1/m, b=0.05/m$)
Fig. 4 Water PSF at 2AL($c=0.1/m, b=0.05/m$)

除了水体散射产生的亮度之外,点光源本身也是一个具有单位能量的亮度脉冲信号,其亮度为无穷大,位于极角 $\theta = 0$ 处,图 4 中未画出,由此水体 PSF 的表达式如下

$$\text{PSF}(\theta) = k \cdot \delta(r, \theta) \cdot e^{-c \cdot r} + k \cdot L(\theta) \quad , \quad (2)$$

上式表明水体 PSF 由两部分组成,其中第一部分 $k \cdot \delta(r, \theta) \cdot e^{-c \cdot r}$ 为点光源直射光形成的亮度,具有冲击函数特性,第二部分 $k \cdot L(\theta)$ 为水体散射亮度分布, k 为归一化系数, $\delta(r, \theta)$ 为点光源在无水体吸收和散射条件下距离点光源 r 处时的亮度分布函数,满足下式^[31]

$$\delta(r, \theta) = \begin{cases} \infty & \theta = 0 \text{ 时} \\ 0 & \theta \neq 0 \text{ 时} \end{cases} \quad , \quad (3)$$

$$\int_0^\pi 2\pi \cdot \delta(r, \theta) \sin\theta d\theta = \frac{1}{r^2} \quad , \quad (4)$$

如(3)式所示,点光源亮度分布函数 $\delta(r, \theta)$ 在 $\theta = 0$ 时具有无穷大亮度,其余处为零,(4)式表明点光源亮度分布对空间 4π 球面角的积分值与距离的平方成反比,且在 $r = 1$ 时的积分值为 1,由于球面沿极轴的旋转对称性,表达式只与极角 θ 有关,而与方位角无关。

由于 $\text{PSF}(\theta)$ 具有旋转对称性,在 4π 球面角范围内归一化后有

$$\int_0^\pi 2\pi \cdot \text{PSF}(\theta) \sin\theta d\theta = 1 \quad , \quad (5)$$

将(2)式代入(5)式后可得

$$k \cdot \frac{e^{-c \cdot r}}{r^2} + k \int_0^\pi 2\pi \cdot L(\theta) \sin\theta d\theta = 1 \quad , \quad (6)$$

由(6)式可求出系数 k ,将其代入式(2)可得长度为 r 的水体归一化 PSF,此时称 $k \cdot \frac{e^{-c \cdot r}}{r^2}$ 为水体的对比度极限因子。信号的空间频率为零时,水体 MTF 为 1,随着空间频率增大,水体 MTF 将趋近对比度极限因子,其物理意义为点光源直射光在整个水下光场能量中所占的比例。

3.3 水体 MTF 推导

水体 PSF 定义域为整个 4π 球面空间,在求解水体 MTF 之前,对比二维平面上的点扩展函数 $h(x, y)$ 与其对应的光学传递函数 $H(u, v)$ 的关系,后者应为前者的傅立叶变换

$$H(u, v) = \iint_{-\infty}^{+\infty} h(x, y) \cdot e^{-i2\pi(ux+vy)} dx dy \quad , \quad (7)$$

调制传递函数 MTF 为光学传递函数 OTF 的模即 $|H(u, v)|$,当 $h(x, y)$ 为旋转对称时, $H(u, v)$ 为实数,此时 MTF 等于 OTF,由于水体散射的空间对称性,故水体 MTF 即为水体 OTF。

二维平面域的调制传递函数可以由点扩展函数直接进行傅立叶变换得到,因为 $e^{i2\pi(ux+vy)}$ 可看作是不同方向上的单一空间频率的平面波。但在球面坐标系中不存在一般意义上的单一空间频率信号,而且傅立叶变换无法简单推广到球面上。为了克服这个困难,借助球谐函数^[38]这一数学工具来构造球面上的空间频率信号并推导球面空间中的水体 MTF。

球谐函数 $Y_l^m(\theta, \phi)$ 中 θ 为极角, ϕ 为方位角,当次数 $m = 0$ 时称为带状球谐函数 $Y_l(\theta)$,其值与方位角 ϕ 无关,它具有特定的对称性和空间频率特性,用它来描述球面上的信号,可类比为单一空间频率的函数,其阶数 l 决定了其在球面上的波动频率,阶数越大,对应的空间频率越高,带状球谐函数的形式为:

$$Y_l(\theta) = \sqrt{\frac{2l+1}{4\pi}} P_l(\cos\theta) \quad , \quad (8)$$

其中 P_l 是勒让德多项式^[38], 阶数 l 对应的球面信号 $Y_l(\theta)$ 的空间频率为 $\frac{l}{2\pi}$ cycles/rad。

为求解水体 MTF, 将球面信号 $Y_l(\theta)$ 与水体 PSF 在球面上进行卷积运算, 得到与 $Y_l(\theta)$ 同阶的非归一化带状球谐函数 $Z_l(\theta)$, 则 $Z_l(\theta)$ 相对于 $Y_l(\theta)$ 的对比度衰减 $\left| \frac{Z_l(\theta)}{Y_l(\theta)} \right|$ 即为水体 MTF, 由于该值与 θ 无关, 故可直接计算 $\left| \frac{Z_l(0)}{Y_l(0)} \right|$, 曲线 $\left| \frac{Z_l(0)}{Y_l(0)} \right| \sim l$ 即为水体 MTF 曲线。

计算水体 MTF 的流程图如下, 其中阶数 l 理论上可取到无穷大, 在仿真中暂取到 1000。

设水体衰减系数 $c = 0.1/m$, 散射系数 $b = 0.05/m$, 视点距离为 $2AL$ (20 米), 对应的归一化水体 PSF 如式(2), 将 $Y_l(\theta)$ 与水体 PSF 进行球面卷积, 根据图 5 的流程可绘制水体 MTF 曲线如下。

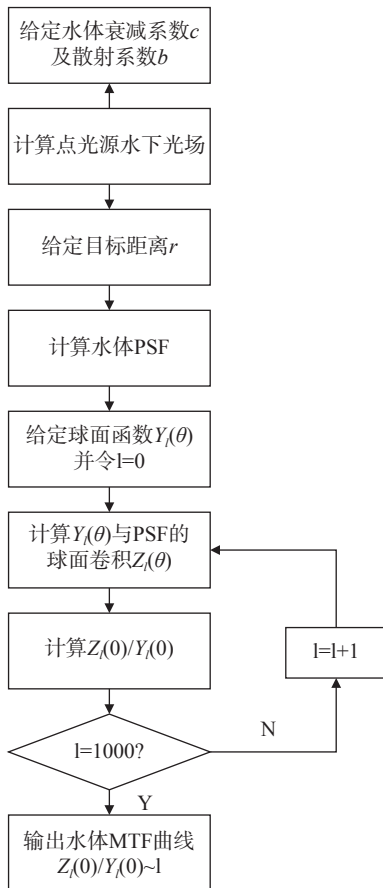


图 5 水体 MTF 求解流程图
Fig. 5 Flow chart for solving water MTF

如图 6, 横坐标为阶数 l , 对应的信号空间频率为 $\frac{l}{2\pi}$ cycles/rad, 可以看出, 随着空间频率增加, MTF 值迅速从 1 降低并趋近一个不为零的正

值, 这个值即为对比度极限因子, 因此水体 MTF 不存在截止频率。只在极低空间频率时, 水体 MTF 才明显大于对比度极限因子, 随空间频率增大迅速接近对比度极限因子, 它描述了水体对信号的对比度衰减下限。下面给出 3 种不同参数的水体, 分别绘制出对比度极限因子随距离 r 的变化曲线。

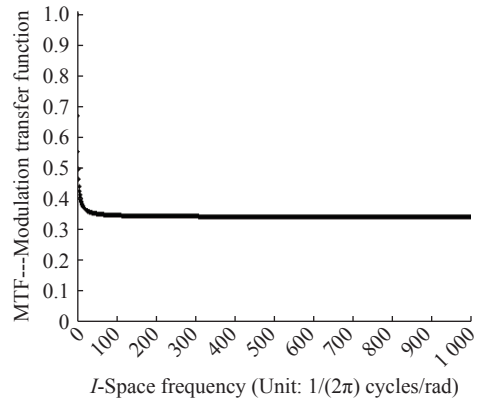


图 6 在 $2AL$ 处的水体 MTF 曲线 ($c=0.1/m, b=0.05/m$)
Fig. 6 Water MTF at $2AL$ ($c=0.1/m, b=0.05/m$)

计算对比度极限因子的步骤为: 先给定水体的衰减系数 c 和散射系数 b , 计算点光源的水下光场, 再计算给定距离 r 处的水体散射亮度分布 $L(\theta)$ 如式(1), 然后给出水体 PSF 的表达式(2), 再根据 PSF 的归一化条件(5)通过式(6)计算出系数 k , 得到 $k \cdot \frac{e^{-c \cdot r}}{r^2}$ 即为对比度极限因子。

下面给出 3 种水体的对比度极限因子曲线。

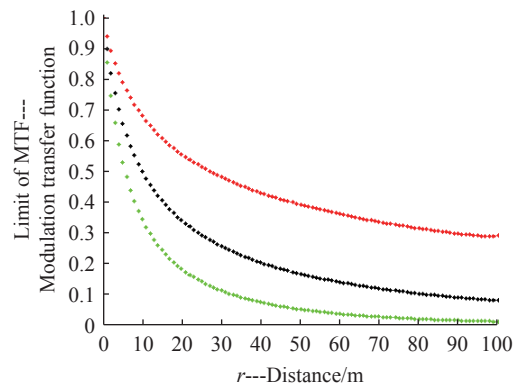


图 7 不同水体的对比度极限因子曲线 (红色曲线: $c=0.1/m, b=0.03/m$; 黑色曲线: $c=0.1/m, b=0.05/m$; 绿色曲线: $c=0.1/m, b=0.07/m$)

Fig. 7 Limit of MTF of different types of water (Red: $c=0.1/m, b=0.03/m$; Black: $c=0.1/m, b=0.05/m$; Green: $c=0.1/m, b=0.07/m$)

对比度极限因子与水体浑浊度和距离有关,

随着距离增大,对比度极限因子逐渐减小,当水体散射系数 b 增加时,对比度极限因子也随着减小,如图中红色、黑色、绿色曲线逐渐下降。由此,在 VSF 为球形对称时,确定了水体的衰减系数、散射系数以及距离后,可以确定水体的对比度极限因子,这也是水体传输信号能力的下限。

4 结 论

以理想点光源水下光场分布为基础,建立了一种理想的水下光电成像模型,在水体 VSF 为球形对称时,通过路径亮度积分推导出球面空间中的水体 PSF 及 MTF,为信号水下传输特性的研究建立了一种不依赖经验的模型。推导过程中得到了水体传输信号的对比度极限因子,指出了水体传输信号能力的下限。

实际水下光学成像系统的 MTF 应为水体 MTF、水下光学系统 MTF 和探测器 MTF 三者的

乘积,由于水体 MTF 不存在截止频率,因此水下光学成像系统的截止频率由后两者决定。

本文解决了水体 VSF 球形对称时的水体 MTF 推导问题,然而实际海水 VSF 往往具有极强前向、平滑过渡、较弱后向的特征,要建立实用性更强的水体 MTF 推导模型,必须解决一般形式水体 VSF 的水体 MTF 推导问题,特别是具有小角度前向散射特性的水体 MTF 推导,更复杂的还有偏振光照明^[39-40]、以及水下散射颗粒不具有各向同性特征时,此时水体 VSF 将不具有方位旋转对称性。另外,本文的水体 MTF 推导算法还局限在对静态水下光场的求解,当采用脉冲光源进行水下照明时,水下光场的时间特性不能忽略,例如采用距离选通^[6]技术后,水下成像质量将大幅改善,因此,有必要从微观机理上阐明动态光场在何种条件下能有效提升水下成像质量,为设计和定量优化水下激光成像系统提供理论支撑。解决了这些问题,就得到了更具普遍意义的水体 MTF 推导方法。

参考文献:

- [1] DUNTLEY S Q. Light in the sea[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1963, 53(2): 214-233.
- [2] JERLOV N G. *Marine Optics*[M]. Amsterdam: Elsevier, 1976.
- [3] MOBLEY C D. *Light and Water: Radiative Transfer in Natural Waters*[M]. London: Academic Press, 1994: 21-69.
- [4] KOCAK D M, CAIMI F M. The current art of underwater imaging – with a glimpse of the past and vision of the future[J]. *Marine Technology Society Journal*, 2005, 39(3): 5-26.
- [5] CAIMI F M, KOCAK D M, DALGLEISH F, et al.. Underwater imaging and optics: recent advances[C]. *Proceedings of the OCEANS 2008*, IEEE, 2010: 1-9.
- [6] JAFFE J S. Underwater optical imaging: the past, the present, and the prospects[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2015, 40(3): 683-700.
- [7] CAO X N, YANG H, WANG M, et al.. Integrated optomechanical ultrasonic sensors with nano-Pascal-level sensitivity[J]. *Light: Science & Applications*, 2026, 15(1): 171, doi: 10.1038/s41377-026-02238-0.
- [8] WELLS W H. Loss of resolution in water as a result of multiple small-angle scattering[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1969, 59(6): 686-691.
- [9] WELLS W H. Theory of small-angle scattering[R]. 1973. (查阅网上资料,未找到出版地和出版者信息,请确认).
- [10] JAFFE J S. Monte Carlo modeling of underwater-image formation: validity of the linear and small-angle approximations[J]. *Applied Optics*, 1995, 34(24): 5413-5421.
- [11] 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.
- [12] VOSS K J, CHAPIN A L. Measurement of the point spread function in the ocean[J]. *Applied Optics*, 1990, 29(25): 3638-3642.
- [13] VOSS K J. Simple empirical model of the oceanic point spread function[J]. *Applied Optics*, 1991, 30(18): 2647-2651.
- [14] MCLEAN J W, VOSS K J. Point spread function in ocean water: comparison between theory and experiment[J]. *Applied Optics*, 1991, 30(15): 2027-2030.
- [15] 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.
- [16] HOU W L, WEIDEMANN A D, GRAY D J, et al.. Imagery-derived modulation transfer function and its applications

- for underwater imaging[J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 6696: 669622.
- [17] RONALD J, ZANEVELD V, BEARDSLEY G F. Modulation transfer function of sea water[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1969, 59(4): 378-380.
- [18] DEL GROSSO V A. Modulation transfer function of water[C]. *Proceedings of the OCEAN 75 Conference*, IEEE, 1975: 331-347.
- [19] BRUSCAGLIONI P, DONELLI P, ISMAELLI A, *et al.*. Monte Carlo calculations of the modulation transfer function of an optical system operating in a turbid medium[J]. *Applied Optics*, 1993, 32(15): 2813-2824.
- [20] MCGLAMERY B L. A computer model for underwater camera systems[J]. *Proceedings of SPIE*, 1980, 0208: 221-232. (查阅网上资料, 未找到页码信息, 请确认).
- [21] JAFFE J S. Computer modeling and the design of optimal underwater imaging systems[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 1990, 15(2): 101-111.
- [22] PALOWITCH A W. The limits of optical imaging system[J]. *Underwater System Design*, 1992, 3(4): 11-17. (查阅网上资料, 未找到本条文献信息, 请确认).
- [23] HOU W L. A simple underwater imaging model[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(17): 2688-2690.
- [24] 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).
- [25] 徐聪辉, 李彩. 广角水体体散射函数测量技术及其应用研究进展[J]. *遥感学报*, 2019, 23(6): 1078-1090.
XU C H, LI C. Progress of measurement technology and application of general-angle Volume Scattering Function of water[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2019, 23(6): 1078-1090. (in Chinese).
- [26] 黄晓圣, 吴东, 张亭禄, 等. 图像式海水小角度散射函数测量仪[J]. *光学学报*, 1998, 18(12): 1716-1720.
HUANG X SH, WU D, ZHANG T L, *et al.*. A scatterometer for sea water scattering function measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, 18(12): 1716-1720. (in Chinese).
- [27] 于亦凡, 陈维真, 黄海龙, 等. 图像传输方法测量海水的点扩展函数[J]. *光学学报*, 2000, 20(12): 1647-1651.
YU Y F, CHEN W ZH, HUANG H L, *et al.*. Measurement of the point spread function of seawater with method of image transmission[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, 20(12): 1647-1651. (in Chinese).
- [28] 刘智深, 黄晓圣, 贺明霞, 等. 海洋与大气光学传递函数与自然光辐射场的关系[J]. *光学学报*, 1987, 7(8): 707-713.
LIU ZH S, HUANG X SH, HE M X, *et al.*. Relation between optical transfer function and natural light field in the sea or atmosphere[J]. *Acta Optica Sinica*, 1987, 7(8): 707-713. (in Chinese).
- [29] 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.
HE D H, LI Y Y, ZHOU SH J. Iterative solution of underwater scattering light field[J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(2): 297-305. (in Chinese).
- [30] 何大华, 程朴, 李阳阳. 水下光场的蒙特卡罗法求解[J]. *应用光学*, 2023, 44(2): 268-274.
HE D H, CHENG P, LI Y Y. Monte Carlo method for solving underwater light field[J]. *Journal of Applied Optics*, 2023, 44(2): 268-274. (in Chinese).
- [31] 何大华, 张瑞文, 李阳阳, 等. 水下光电成像模型[J]. *光学与光电技术*, 2023, 21(5): 107-116.
HE D H, ZHANG R W, LI Y Y, *et al.*. Underwater electro-optical imaging model[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2023, 21(5): 107-116. (in Chinese).
- [32] 黄有为, 金伟其, 王霞, 等. 凝视型水下激光成像后向散射光理论模型研究[J]. *光学学报*, 2007, 27(7): 1191-1197.
HUANG Y W, JIN W Q, WANG X, *et al.*. Theoretical optical backscattering model for staring underwater laser imaging[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(7): 1191-1197. (in Chinese).
- [33] 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).
- [34] 刘雪明, 张明德, 孙小蕊. 水下激光成像系统的 MTF 分析[J]. *中国激光*, 1999, 26(4): 332-336.
LIU X M, ZHANG M D, SUN X H. Analysis of the MTF for an underwater laser imaging system[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 1999, 26(4): 332-336. (in Chinese).
- [35] 赵璞. 基于 Monte Carlo 方法水下光学成像 MTF 研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.
ZHAO P. *The research of underwater optical imaging MTF based on the Monte Carlo method*[D]. Qingdao: Ocean

- University of China, 2013. (in Chinese).
- [36] 孙立颖, 夏珉, 韩捷飞, 等. 湍流环境中水下成像系统的调制传递函数研究[J]. *光学学报*, 2016, 36(8): 0801002.
SUN L Y, XIA M, HAN J F, *et al.*. Research of modulation transfer function of underwater imaging system in turbulent environment[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(8): 0801002. (in Chinese).
- [37] 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).
- [38] 王竹溪, 郭敦仁. 特殊函数概论[M]. 北京: 北京大学出版社, 2000. (查阅网上资料, 不确定年份是否正确, 请确认).
WANG ZH X, GUO D R. *Introduction to Special Functions*[M]. Beijing: Peking University Press, 2000. (in Chinese).
- [39] 吴厚德, 翟予峥, 王洪昌, 等. 实时输出视频的水下主动偏振成像[J]. *光学精密工程*, 2024, 32(10): 1443-1455.
WU H D, ZHAI Y ZH, WANG H CH, *et al.*. Real-time video output method for underwater active polarization imaging[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2024, 32(10): 1443-1455. (in Chinese).
- [40] BAI X Y, LIANG Z D, ZHU ZH M, *et al.*. Polarization-based underwater geolocation with deep learning[J]. *eLight*, 2023, 3(1): 15.

作者简介:



何大华(1973—), 男, 湖北武汉人, 博士, 高级工程师, 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