

海洋与大气光学传递函数 与自然光辐射场的关系

刘智深 黄晓圣 贺明霞 章志鸣
(山东海洋学院物理系) (上海复旦大学物理系)

提 要

本文根据海洋辐射传递的变换模型确定海水光学传递函数与海中自然光场辐亮度分布的关系, 分析了海中辐射场角频率谱变化。提出一种新的估算海中辐射场分布和测定海水光学传递函数的方法。这种方法完全适用于大气。

关键词: 光学传递函数, 点扩展函数

一、引 言

海水光学传递函数(OTF)是与水中激光传输, 海洋激光雷达, 水中图像传输切相关的重要海洋光学参量。美国海军研究实验室^[1,2], 海军水下系统中心、空军^[3]和海洋研究部门^[4,5]近年来都十分重视这方面的研究。1963年 Duntley 提出用传统的海洋光学参数 α (海水吸收系数)、 β (海水体散射函数) 和 c (准直光衰减系数) 来分析短路径的水中图像传输^[4], 但对海水体散射函数 β 的测量是相当困难的, 尤其是小角度散射测量结果发表甚少^[6]。有人用蒙特卡罗方法分析通过水中长路径的图像传输问题^[7], 但计算工作量甚大, 且只能得到理论结果, 如何实测, 尚无途径。直到1975年相继发表了海水光学传递函数的实测结果^[1,2,8]。其主要方法是在水中安置蓝-绿激光器及接收系统, 设备庞大、昂贵, 且长路径时, 难以对准光轴。1979年有人提出在水中安置点光源, 以测定点扩展函数(PSF)^[8], 这种方法不要求严格对准光轴, 但仍需强功率供电, 且光强随路径增加迅速衰减, 光源的有效利用率大大低于激光准直光方法。

本文将(1)给出海水光学传递函数和海中自然光辐射场分布(辐亮度分布)的定量关系;(2)分析海中辐射场随深度增加, 其角频谱的变化;(3)提出不用人造光源测定海水光学传递函数估算海中各深层辐射场的方法。

长期以来海洋光学的研究一直未给出海水光学传递函数和海中自然辐射场之间的关系。其原因在于人造光源初始辐射场简单(如点光源, 准直光源)、易于讨论, 而自然光辐射场分布复杂难以讨论。因此迄今为止大量的海洋光学的文献始终未触及到这一重要命题。如果确定了海水光学传递函数和自然光辐射场的定量关系, 那末就可以十分简便地用水中辐亮度计(光度计)测定任何海区的辐射场, 从而得到该海区的海水光学传递函数。由于无须用人造光源, 设备简单、耗费大大减小。又可根据海水光学传递函数从理论上估算海中各

深层的自然光辐射场分布。这对于空中与水下光通讯,海洋激光雷达,水中图像传输等重要应用研究都是十分有意义的。本文将运用海洋辐射传递的傅里叶光学方法和海洋辐射传递的信息传输概念和海洋辐射传递变换物理模型^[9]进行讨论。

二、海水光学传递函数与海中自然光辐射场的关系

根据海洋辐射传递理论,海中辐射场由辐射场由辐射传递方程决定

$$\frac{dL}{dr} = -cL + \int_{4\pi} L\beta(\theta-\theta')d\omega', \quad (1)$$

式中 L 为辐亮度, r 为路径长度, c 为海水体衰减系数, β 为仅与 $\theta-\theta'$ 有关的海水体散射函数。方程(1)右边第一项为线性衰减项, 第二项为多次散射造成的路径辐亮度增量。方程(1)是一个难以解析求解的微-积分方程。如果第二项为零, 则方程(1)为一简单的微分方程, L 随 r 增加向指数衰减, 这时点扩展函数为 $\delta(\theta)$ 函数, 光学传递函数为常数, 即频响为常数。由此可见使光学传递函数频响宽窄, 主要是由第二项起作用。我们已运用线性系统理论给出了简洁的海洋辐射传递变换模型^[9]。对方程(1)作傅里叶-贝塞耳变换, 可得到一简单的微分方程

$$\frac{dL}{dr} = -cL + \beta L, \quad (2)$$

式中黑体字为相应傅里叶-贝塞耳变换, 显然

$$L(r, \psi) = L_0(0, \psi) \exp[-(c-\beta)r], \quad (3)$$

令 $L_0 = \delta(\theta)$, 则 $L_0 =$ 常数, 于是海水的 OTF(r, ψ) 为

$$\text{OTF}(r, \psi) = \exp[-(c-\beta)r], \quad (4)$$

对于不均匀分布, 则可将(4)式写为

$$\text{OTF}(r, \psi) = \exp\left[-\int_0^r (c-\beta)dr\right]. \quad (5)$$

(4)式给出了海水光学传递函数和海中固有光学参数 c 和 β 的关系。不少文章指出海水的光学传递函数 OTF 是路径长度 r 的指数衰减函数^[3,6,9], 可表示为

$$\text{OTF}(r) = \exp[-D(\psi)r], \quad (6)$$

式中 $D(\psi)$ 称为空间频率衰减函数, 根据(4)式

$$D(\psi) = c - \beta. \quad (7)$$

我们可以从光学信息处理的物理概念分析上述结果。式中 c 为一与角频率 ψ 无关的值, 而海水体散射函数 $\beta(\theta)$, 在一般含有大粒子(粒子半径远大于波长)的海水中是一种方向性很强的箭型分布函数。图1为测得的中国近海的海水体散射函数。(35°~135°)^[10] 因而可以推知 $\beta(\theta)$ 的傅里叶-贝塞尔变换 $\beta(\psi)$ 是一种有限带宽的类似于钟型的函数, 其值随 β 增大而减小, 因此根据(7)式, $D(\psi) = c - \beta$ 为一随 ψ 增大而增大的函数。由(4)、(6)式可知, OTF(r) 随路径 r 增加为一高频衰减大于低频衰减的函数, 因而 OTF(r) 随 r 增加, 频带被压缩, 信息量减小。所以可以说导致水中图像随 r 增加, 分辨率降低, 图像模糊的物理过程也即是 OTF 频响变窄的过程。

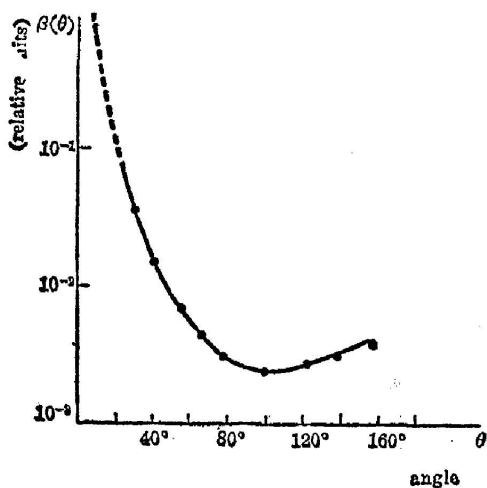


Fig. 1 Volume scattering function of sea water in East China Sea

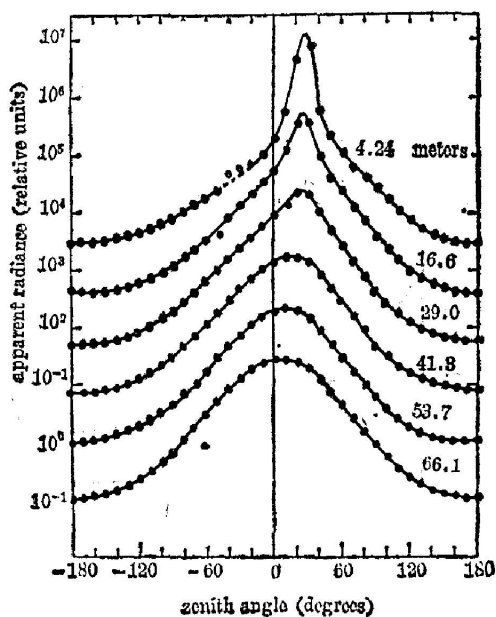


Fig. 2 Typical radiance distribution in water

现在我们来分析水中自然光场与海水 OTF 的关系。从实际水中测量的辐亮度分布结果^[11]可以看出(图 2),随着水中深度的增加,辐亮度分布 $L(\theta)$ 的方向性变得越来越差,也即 $L(\theta)$ 的频响越来越窄,这与 OTF(r) 随 r 增加的频响变化趋势相一致。可以预料海中自然光的辐亮度分布随 r 的变化应该受到海水的 OTF(r) 的制约,显然根据(2)式、(6)、(7)式可改写为

$$\text{OTF}(r, \psi) = \exp\left[\frac{1}{L} \frac{dL}{dr}\right], \quad (8)$$

$$D(\psi) = -\frac{1}{L} \frac{dL}{dr}. \quad (9)$$

这适用于随 r 而变化的不均匀情况,对于均匀情况,根据(3)、(4)式

$$\text{OTF}(r, \psi) = L(r, \psi) / L(0, \psi). \quad (10)$$

由此我们用海洋辐射传递变换模型⁽²⁾简单地给出了 OTF(r, ψ) 与水中自然光场的解析关系式(8)、(10)式。这是一个新的有理论意义和应用价值的结果。在海洋光学理论意义上,它确定了 $L(\theta, r)$ 与 OTF(r, ψ) 的关系。

我们不必如传统海洋光学方法那样竭力去求解难以求解的辐射传递积—微分方程(1),只需根据(10)式来确定海中多个位置的辐亮度分布 $L(r)$, 它所确定的 $L(r)$ 随 r 的变化关系又是如此简洁而方便。OTF(r, ψ) 已不仅仅是水中可见度、图像传输所需要研究的参数^[3], 而将成为海洋光学各种理论讨论中所需的参量函数。在应用意义上显然可由自然光辐亮度分布 $L(\theta, r)$ 随 r 的变化来确定海水的 OTF(r, ψ) 免去了以前确定海水 OTF 时必须在水中置放人造光源的耗费和困难。并且由于可用辐亮度计测定 4π 各个方向的 $L(\theta)$ 值,因此所得出的 OTF(r, ψ) 将不受限于前向的小角度范围。

三、海中自然光场的角频率谱

太阳光和天空光透过海表面后,将受到海水的散射与吸收。从散射过程来说,显然在海表层的自然光场分布的方向性要比海洋深层的自然光场分布的方向性要强,因为经过海水

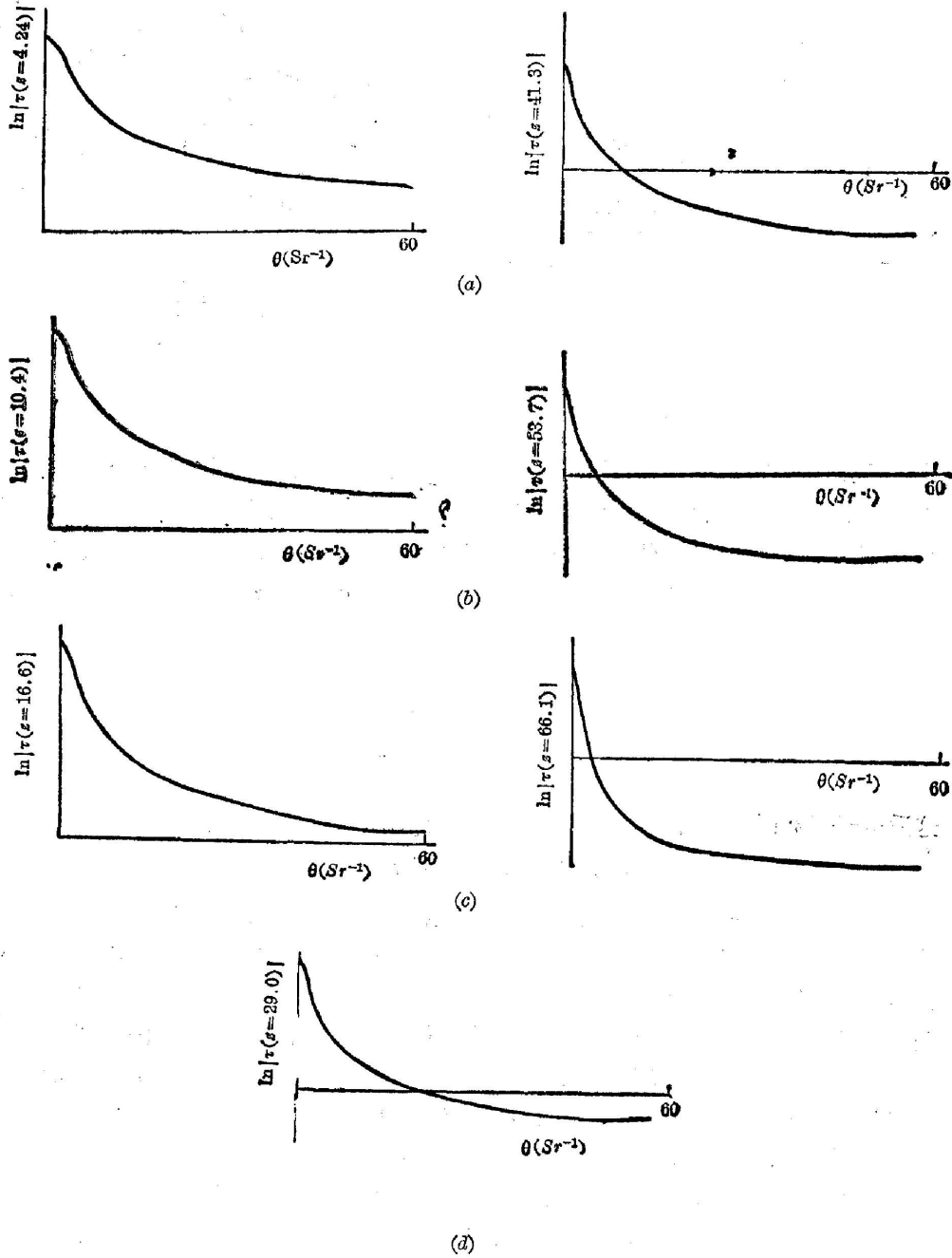


Fig. 3 Angular frequency spectrum of the radiance distribution in water from the measured in situ

的路径越长,多次散射作用路径越长,使自然光场分布的方向性退化。图 2 是根据测得各深度海中辐亮度分布(光场分布)数据^[11]所画的分布图。看出,辐亮度分布随深度增加,方向性退化的过程。但是迄今为止尚未对这一现象的信息传输过程进行过讨论,更没有讨论其与海水光学传递函数的关系。我们将会看到这一讨论的明显物理意义。上一节已从信息传递过程说明了 OTF(r, ψ) 随 r 增加,频带变窄,故根据(10)式, $L(0, \theta)$ 的频谱 $L(0, \psi)$ 的带宽必然大于 $L(r, \theta)$ 的频谱 $L(r, \psi)$ 带宽。

图 3 是根据实测各深层辐亮度数据(图 2)^[11]经过计算机运算所得出的辐亮度角频谱, 显见,随深度增加,辐亮度分布的空间角频谱变窄,即辐亮度分布的方向性受到水体散射而退化,也可以说随深度增加辐亮度分布所携带的表层辐射场特征(信息)越来越少。

四、由自然光辐亮度分布确定海水 OTF

文献[1~6]所论述的确定海水 OTF 的测量方法均采用目标物体 $f(x, y)$ (如正弦靶或朗奇光栅靶)被人造光源照明,通过海水,受到海水点扩展函数 PSF 的作用,并假设海水散射满足线性叠加原理,则靶的像为 $f(x, y)$ 与 PSF($x, y; r$) 的卷积

$$g(x, y; r) = f(x, y) \otimes \text{PSF}(x, y; r), \quad (11)$$

测量 $g(x, y)$, 可得到 PSF($x, y; r$), 其傅里叶变换即为海水 OTF

$$\text{OTF}(r; \nu_x, \nu_y) = \mathcal{F}\{\text{PSF}(x, y; r)\},$$

若 PSF 为中心对称分布, 则用傅里叶-贝塞尔变换

$$\text{OTF}(r, \psi) = \mathcal{B}\{\text{PSF}(\theta, r)\}. \quad (12)$$

如前所述这种测量方法的缺点需昂贵而庞大的光学系统(尤其对长路径), 本文提出用测定不同深度的 $L(\theta, r)$ 计算其傅里叶-贝塞尔变换, 即可根据(10)式, 得出海水的 OTF(r)。图 4 即为由海中自然光辐亮度得到的不同 r 的海水 OTF(r, ψ)。

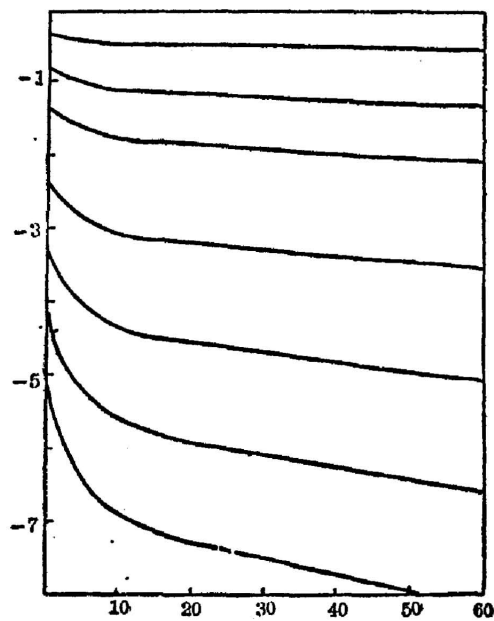


Fig. 4 Optical transfer function of sea water from the natural light radiance distribution in water

五、海洋光学中光学传递函数的重要作用

根据本文的论述,海水光学传递函数不仅是水中图像传输的重要参量,而且也是海洋光学的重要参量。显然根据海水光学传递函数可确定一系列海洋光学参数,如

- (1) 海水体积衰减系数 σ

$$c = \lim_{\psi \rightarrow \infty} \frac{1}{r} \ln \text{OTF}(r, \psi). \quad (13)$$

(2) 海水吸收系数 a

$$a = -\frac{1}{r} \ln \text{OTF}(r, \psi) |_{\psi=0}. \quad (14)$$

(3) 显然由 a 和 c 可确定海水散射系数

$$b = c - a. \quad (15)$$

(4) 海水体积散射函数 β

$$\beta = \mathcal{B} \left\{ c + \frac{1}{r} \ln \text{OTF}(r, \psi) \right\}. \quad (16)$$

根据(10)式, 显然已知 $\text{OTF}(r, \psi)$ 及海面的辐亮度分布, 可推出各深度的辐亮度分布。这将可用以对海中各深度的辐亮度背景进行理论估计, 也可为海中观察系统的能见度计算提供数据。

六、小 结

根据我们提出的海洋辐射传递变换模型^[9] 不仅可得出海水光学传递函数 OTF 和海水固有光学性质的关系, 而且可简易地得出海水光学传递函数和海中自然光场的关系。由这一简结的物理关系将可以简单地从理论上计算得到海中各深层的辐亮度分布。同时, 由此又提出了一种新的测定海水光学传递函数的方法, 即用辐亮度计测定海中自然光辐亮度的方法, 它避免了水中光源耗费和置放的困难, 易于在各海区进行测量。显然本文结论同样可适用于大气。

参 考 文 献

- [1] V. A. Del Grosso; *Proc. SPIE*, 1975, Vol. 64, 34~49.
- [2] V. A. Del Grosso; *Proc. SPIE*, 1978, Vol. 160, 74~101.
- [3] L. E. Metens, F. S. Replogle; *J. O. S. A.*, 1977, **67**, No. 8 (Aug), 1105~1117.
- [4] S. Q. Duntley; *J. O. S. A.*, 1963, **53**, No. 2 (Feb), 214~233.
- [5] S. Q. Duntley; in «*Optical Aspects of Oceanography* by N. G. Jerlov and E. S. Nielsen», (Academic Press, N. Y., 1974).
- [6] H. Wells; *J. O. S. A.*, 1969, **59**, No. 6 (Jun), 686~691.
- [7] C. J. Funk; *Appl. Opt.*, 1973, **12**, No. 2 (Feb), 301~313.
- [8] R. C. Honey; *Proc. SPIE*, 1979, Vol. 208, 242.
- [9] 刘智深, 贺明霞; «*中国科学(A)*», 1985, No. 11 (Nov), 1014~1021.
- [10] 私人通讯。
- [11] J. E. Tyler; «*Handbook of Optics* Section 15 By W. G. Driscoll», (McGraw-Hill Book Company, 1978).

Relation between optical transfer function and natural light field in the sea or atmosphere

LIU ZHISHEN, HUANG XIAOSHENG, HE MINGXIA

(*Department of Physics, Shandong College of Oceanography*)

(*Department of Physics, Fu-Dan University, Shanghai*)

ZHANG ZHIMING

(Received 7 July 1986; revised 17 November 1986)

Abstract

In this paper relationship between the optical transfer function of sea water and the distribution of natural radiance field in the sea is simply and directly determined based on the transform model of the sea radiance transfer. The variance of the angle spectrum of the sea radiance field is analysed. A new simple method of estimating the distribution of the sea radiance field and measuring the optical transfer function of the sea water is proposed. The method is perfectly suitable for the atmospheric circumstances.

Key Words: OTF (optical transfer function) PSF (point spread function).