

# 水下激光成像系统中的海水散射\* Seawater Dispersion for Underwater Laser Imaging System

陈名松 敖发良 张德琨

Chen Mingsong Ao Faliang Zhang Dekun

(桂林电子工业学院电子信息分院 桂林 541004)

(Electronic Information College, Guilin Institute of Electronic Technology, Ginlin, 541004)

**摘要** 对蓝绿激光的海水散射进行理论分析,并进行不同水样的对比实验,给出了分析结果。

**关键词** 海水散射 蓝绿激光 衰减

中图法分类号 O 436.2

**Abstract** The seawater dispersion of blue-green laser was analyzed in theory. Parallel experiments to varied water samples were conducted, and an analysis result was given.

**Key words** seawater dispersion, blue-green laser, attenuation

光在海水中传播存在所谓的“蓝绿窗口”。这一事实,使蓝绿激光在海洋开发中起着重要作用,而海水散射和吸收是决定蓝绿激光在海水中衰减的主要因素。激光功率损耗和波前畸变是由于海水中粒子对激光辐射场的吸收和散射引起的,这些影响随激光波长开始接近粒子横截面尺寸而变得最为严重。因为海水中粒子尺度从厘米级到微米级,因此激光辐射在传播过程中随机地改变其波束特性,致使光波强度、相位和频率在时间和空间上都呈现随机起伏,现象上表现为光束截面内的强度闪烁和光束完区漂移以及光束的扩展畸变、空间相干性退化等,严重影响蓝绿激光在海水中的传播性能。散射过程引起光分布的复杂的变化,散射研究中的重要物理量是体积散射函数,它是用散射角度的函数来表示散射特性的。

把散射问题同海水环境联系起来考虑,这给研究带来相当大的困难。主要原因是海水中的散射有两个截然不同的情况,即由海水本身产生的散射和由悬浮离子所引起的散射。纯水引起的散射在温度和压力的影响下变化较小,而离子的散射却与浓度变化很大的颗粒性物质有关。海水应该看成是由具有吸收本领的,随机取向且不规则的粒子所组成的复杂色散系统。

## 1 海水散射的理论分析

海水引起的散射通常被当作一种分子散射的问题来考虑。分子散射的概念是瑞利

(Rayleigh)<sup>[1]</sup>方程自然推广的结果。设有一均匀电场  $E$ , 则在其作用下将使微粒极化成强度  $P = \alpha E$  的偶极子(其中  $\alpha$  是微粒的极化率)。振荡偶极子向四面八方辐射。就  $N$  个粒子其大小相对波长较小, 且各向同性及随机分布的情况而言, 沿  $\theta$  方向的辐射强度可由下式表示:

$$i = \frac{8\pi^4 N \alpha^2 E^2}{\lambda^4} (1 + \cos^2 \theta),$$

此即著名的波长四次方定律。必须指出, 严格来说只有球形陀螺分子才具有标量极化率。

一种比较适合于液体散射的处理方法就是起伏理论<sup>[2]</sup>, 它认为: 散射是由于液体的小体积元内密度或浓度的起伏所引起, 同时彼此相邻的体积元内的起伏又是相互独立的。根据起伏理论, 得出非偏振光的体积散射函数  $\beta_0(\theta)$  具有如下形式:

$$\beta_0(\theta) = \frac{\pi^2 \eta k T (n^2 - 1)^2}{18 \lambda^4 (n^2 + 2)^2} (1 + \cos^2 \theta),$$

式中  $\eta$  为热压缩系数,  $K$  为波尔兹曼常数,  $n$  为折射率,  $T$  为绝对温度。该方程同时确立了散射与温度和压力的关系。实验证明, 像水这样的致密介质的特性与上式并不完全相等。就理论推导而言, 直接引入折射率随压力变化的实测值  $\partial n / \partial p$  是合适的。于是方程演化如下:

$$\beta_0(\theta) = \frac{2\pi^2}{\lambda^4} k T n^2 \frac{1}{\eta} \left[ \frac{\partial n}{\partial p} \right] \frac{6(1 + \delta)}{6 - 7\delta} \times \left( 1 + \frac{1 - \delta}{1 - \delta} \cos^2 \theta \right). \quad (1)$$

从而得出散射系数  $b_0$  如下的表达式:

$$b_0 = \frac{8\pi}{3} \beta_0(90^\circ) \frac{2 + \delta}{1 + \delta}, \quad (2)$$

其中,  $\delta$  为考虑到散射光的退偏振作用而引入的偏振差。因此, 纯水造成的光散射粗略地遵从  $\lambda^{-4}$  定律。在考虑  $n$  的色散和  $\partial n / \partial p$  的效应后, 幂指数可精确修正到  $-4.23$ 。

由方程 (1) 式可计算出海水散射函数如表 1 (其中激光波长取 542 nm)。

## 2 实验模拟

为了验证 (1) 式及表 1 的结论, 我们针对采集到的不同水样在实验室进行对比实验, 具体实验过程如下:

所用激光器为长沙国防科技大学研制的小功率绿光激光器, 波长为 542 nm。使激光从端面射入一实验水槽, 然后从不同角度测试水样的散射。所用实验水槽是一段长为 2.4 m、直径为 60 mm 的有机玻璃水管, 两端及四周密封但能透光, 而且在测试端加一聚光透镜, 使输出光聚焦在光功率计的探头的受光面上。

实验时, 水管中先不加水, 测量好  $A$ 、 $B$  两点的光功率, 比如此时  $B$  点的光功率为  $P_{B_0}$ ; 然后在水管中加满水, 在保持  $A$  点功率  $P_A$  不变的条件下, 测量此时  $B$  点的光功率  $P_B$ , 我们就可以由  $10 \log(P_B / P_{B_0})$  计算出这种水每米的传光损耗 dB/m。还可求得  $P = P_0 \exp(-\alpha L)$  中的  $\alpha$ 。

系统数据:  $P_A = 95 \mu\text{W}$ ;  $P_{B_0} = 67.5 \mu\text{W}$ ; 水管长度  $L = 2.4 \text{ m}$ 。

根据表 1 中所列角度分别在模拟实验系统对自来水、青狮潭水库湖水、海水等水样进行测试, 发现不同水样都存在散射, 且都近似满足方程 (1) 式。

我们所收集的各种水样对于 542 nm 左右激光传光损耗的典型数据如下:

表 1 海水的理论散射函数

散射角 $\theta$ (°)	散射函数 $\beta_0(\theta)$ ( $\times 10^{-4} \text{ m}^{-1}$ )
0 180	3.15
10 170	3.11
20 160	2.98
30 150	2.78
45 135	2.43
60 120	2.09
75 105	1.85
90	1.73

- 1、自来水传光损耗： $-0.430 \text{ dB/m}$ ， $\alpha = -0.099$ ；
- 2、湖水传光损耗： $-2.866 \text{ dB/m}$ ， $\alpha = -0.66$ ；
- 3、海水传光损耗：近海岸： $-1.50 \text{ dB/m}$ ， $\alpha = -0.34$ ；远海岸： $-0.620 \text{ dB/m}$ ， $\alpha = -0.142$ ；中海： $-0.434 \text{ dB/m}$ ， $\alpha = -0.10$ 。

### 3 结果分析

由实验可以发现，各种水样中都存在不同程度的散射，且都近似满足方程（1），说明我们把该式作为激光水下成像系统中海水散射对信道衰减影响的分析基础是可行的。不过，我们通过实验又发现水样中粒子的种类和浓度对激光的散射有明显的影响，即我们可以观察到水样越纯净，散射作用越小，激光在水中的衰减就越小，其中桂林的自来水传光损耗比较大，但净化以后的自来水（如蒸馏水，过滤水，或加明矾以后的自来水）与文献中所介绍的数值比较接近。青狮潭水库的水样传光损耗比较小；近海岸的传光损耗与国外报到的数很接近；我们还观察到水中离子是造成散射明显增大的主要原因，这种增大由于浓度的起伏引起，因此就应与海水的盐度成正比，而且水池中的水开始时与自来水的传光损耗差不多，但过几天后衰减慢慢增大，这可能是由于微生物繁殖的结果。因此我们必须对方程（1）式进行必要的修正，这是我们下一步的工作。

### 参考文献

- 1 Rayleigh Lord. Philos Mag, 1871, 41: 447~454.
- 2 Einstein A. Ann Phys, 1910, 33: 1275~1293.
- 3 陈根祥, 秦玉文, 赵玉成等. 光通信技术与应用. 北京: 电子工业出版社, 1998.
- 4 陈文革. 大气/海水光散射信道特性的研究 [博士论文]. 华中理工大学, 1997.
- 5 王仕璠, 朱自强. 现代光学原理. 成都: 电子科技大学出版社, 1998.
- 6 苏显渝, 李继陶. 信息光学. 北京: 科学出版社, 1999.
- 7 Gordon H R. Interpretation of airborne oceanic lidar: effects of multiple scattering. Applied Optics, 1982, 21 (6): 2996~3001.
- 8 Phillips D M, Abboot R H, Penny M F. Remote sensing of sea water turbidity with an airborne laser system. J Phys D, 1984, 17: 1749~1756.

（责任编辑：黎贞崇）