

## 〈系统与设计〉

# 水下蓝绿激光传输的衰减系数与水体浊度关系的实验研究

丁 琨, 黄有为, 金伟其, 金凯佳, 李海兰

(光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京理工大学 光电学院, 北京 100081)

**摘要:** 衰减系数和浊度是描述水体光学性质的 2 个重要参量, 研究两者间的关系不仅有助于对水中光传输衰减特性的了解, 也是当前水下光电成像技术研究和应用的需要。本文选用了 6 种不同粒径的  $\text{CaCO}_3$  微粒和 1 种  $\text{SiO}_2$  微粒作为悬浮质, 定量分析了加入悬浮液的水体衰减系数与浊度的关系, 讨论了微粒粒径和折射率对上述关系的影响。实验结果表明: 衰减系数与浊度间存在很好的线性关系; 对于同种悬浮质来说, 其线性拟合斜率与粒径的对数有较好线性关系, 而其拟合截距也与粒径有线性关系; 对于不同种悬浮质来说, 微粒折射率会对拟合斜率产生较大影响。因此, 目前尚难以直接得到由浊度仪测量值换算出衰减系数的普适关系式。

**关键词:** 衰减系数; 水体浊度; 悬浮液; 悬浮质粒径; 折射率

中图分类号: TP391.41

文献标识码: A

文章编号: 1001-8891(2013)08-0467-05

## Experimental Study on the Relationship between Attenuation Coefficient of Blue-green Laser Transmission and the Water Turbidity

DING Kun, HUANG You-wei, JIN Wei-qi, JIN Kai-jia, LI Hai-lan

(Ministry of Education Key Laboratory of Photoelectronic Imaging Technology and System, School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Attenuation coefficient and turbidity are two important parameters to describe the optical properties of water. Researching the relationship between them is not only beneficial for the understanding of the attenuation characteristics of underwater light transmission, but also the research and application needs of the underwater photoelectronic imaging technology. In this paper, six different diameters of  $\text{CaCO}_3$  particles and one kind of  $\text{SiO}_2$  particles are selected as the suspended solids; the relationship between the attenuation coefficient of the water mixed with suspension and the turbidity is analyzed quantitatively; the impact of the particle diameter and the refractive index on this relationship is also discussed. The experimental results show that there is a good linear relationship between attenuation coefficient and turbidity. For the same kind of suspended solid, the slope of the linear fit and the logarithm of the particle diameter have a good linear relationship, as well as the fitting intercept and the particle diameter. For different kinds of suspended solids, the refractive index has a great impact on the fitting slope, which leads to difficulty to obtain the universal equation of attenuation coefficient directly calculated from the measurements of the turbidity.

**Key words:** attenuation coefficient, water turbidity, suspension, particle diameter of suspended solids, refractive index

## 0 引言

光在水中的传输特性是研究水下激光雷达成

像技术的基础<sup>[1]</sup>。水体介质的主要固有光学性质包括水体的吸收和散射。其中, 根据吸收系数确定的水体介质“光学窗口”大约为蓝绿光波段, 因此,

收稿日期: 2013-07-20; 修订日期: 2013-07-31.

作者简介: 丁琨 (1983-), 硕士生, 主要研究方向为光电成像技术等。

通讯作者: 金伟其 (1961-), 男, 博士, 教授/博士生导师, 主要从事微光与红外技术、光电图像处理、光电检测技术等研究。E-mail: jinwq@bit.edu.cn.

基金项目: 国家 863 计划海洋技术领域项目, 编号: 2006AA09Z207。

532 nm 蓝绿激光成为水下激光雷达成像的最佳波长; 水体散射通常用体散射函数表示, 它是散射角的函数, 决定了光在水下传输路径上的光场分布, 影响着水下成像的图像特征, 如图像亮度的非和对比度退化等。水体的衰减系数 (Attenuation Coefficients) 是评价包含吸收和散射的水体质量综合参量, 决定了光在水体介质中的传输距离, 可用于预测水下光电成像的作用距离。

浊度 (Turbidities) 同样是一种衡量水质的参量, 通常定义为由于有机或无机微粒引起的液体浑浊或不透明程度, 常用于评价天然水和饮用水物理性状。虽然从光学的角度来看, 早期提出的浊度定义并非严格, 但随着越来越多的国家和组织都将浊度视为评价水质好坏的重要指标, 对水浊度的测量也越来越客观和准确。浊度的测量方法大体上分为透射式 (包括分光光度计与目视法) 均匀性、散射式以及散射-透射式等 3 类, 每类方法的侧重点不尽相同, 所得到的测量结果也不完全相同。在上述 3 种方法中<sup>[3-5]</sup>, 以散射-透射式浊度仪的灵敏度和测量精度最高, 是目前浊度测量的主要方法, 相应的浊度仪也已产品化。

水体衰减系数与浊度的定义具有相关性, 水体越浑浊, 对光的衰减就越严重, 衰减系数也越大。目前用于水下长距离目标探测的光电成像技术得到迅速的发展<sup>[6-7]</sup>, 在系统设计和应用中往往需要确定水体的衰减系数, 进而对其测量方法和仪器也提出了要求。本文拟通过实验研究水体衰减系数与浊度的关系, 分析其受悬浮质粒径和折射率的影响。

## 1 衰减系数的定义及测量

水体衰减系数为设辐射通量为 $\Phi(\lambda)$ 的单色波长 $\lambda$ 准直光在水介质中传播时, 当通过路径长度为 $dI$ 时, 由于海水散射和吸收而引起辐射通量损失为 $d\Phi(\lambda)$ , 则水体衰减系数定义为<sup>[1]</sup>:

$$c(\lambda) = -\frac{d\Phi(\lambda)}{\Phi(\lambda)dI} \quad (\text{m}^{-1}) \quad (1)$$

于是, 可把辐射在水中传输距离 $l$ 后的辐射通量表示为:

$$\Phi(\lambda, l) = \Phi(\lambda, 0) \exp[-\int_0^l c(\lambda) dI] \quad (2)$$

当衰减系数不随传输路径改变时, 式(2)可以进一步表示为:

$$\begin{aligned} \Phi(\lambda, l) &= \Phi(\lambda, 0) \exp[-c(\lambda)l] \\ &= \Phi(\lambda, 0) \exp[-l/l_0(\lambda)] \end{aligned} \quad (3)$$

式中:  $l_0(\lambda)$ 也称为衰减长度, m, 即辐射能衰减到

1/e 的水体传输长度。

为了测量水体衰减系数, 我们设计了一台简易衰减系数测量仪 (如图 1), 在玻璃管两端分别放置准直激光器和激光功率计, 通过测量注入样品水质前后的激光功率值, 换算得到样品水体的衰减系数。由于水下成像常用 532 nm 的激光光源, 故测量激光采用了功率稳定性 $<2\%$  (@8 hours) 的 532 nm 激光器。由于每份样品的测量时间很短, 可不考虑样品分散的稳定性。

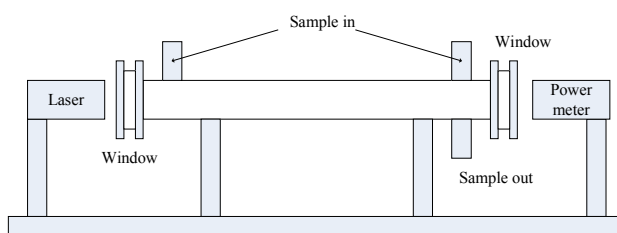


图 1 简易衰减仪的工作原理

Fig.1 Schematic diagram of a simple attenuation meter

## 2 浊度的定义和测量

浊度测量采用 HACH 公司按散射-透射式比率法设计的 2100P 浊度仪 (如图 2)<sup>[5]</sup>, 仪器符合美国环保局 180.1 设计标准, 通过计算 90°方向散射光强与透射光强比来求取浊度值 (如图 3), 测量精度可达 0.01 NTU (浊度单位):

$$T = k \frac{I_{90^\circ}}{I_{0^\circ}} \quad (4)$$

式中:  $T$  为浊度;  $I_{90^\circ}$  和  $I_{0^\circ}$  分别表示 90°方向散射光强和透射光强;  $k$  为比例常数, 可通过标准液校准求得。HACH 2100P 浊度仪的标准液为多种已知浊度的福尔马肼悬浊液。



图 2 HACH 公司的 2100P 浊度仪

Fig.2 HACH 2100P turbidimeter

## 3 衰减系数与浊度关系及粒径的影响

为了研究水体衰减系数与浊度的关系, 以及受悬浮粒子粒径的影响, 我们选取了 6 种不同粒径的

CaCO<sub>3</sub> 微粒，其粒径分布（如图 4）由美国贝克曼库尔特公司 LS13320 激光粒度仪测得。6 种微粒的平均粒径分别为 0.614 μm、2.756 μm、14.32 μm、13.09 μm、18.04 μm、22.37 μm。

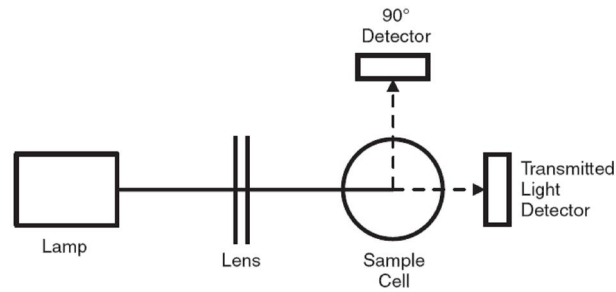


图 3 HACH 2100P 浊度仪的光学系统图

Fig.3 The optical system of HACH 2100P turbidimeter

通过增加悬浮微粒浓度来改变水体的衰减系数和浊度。表 1 给出每种粒径 CaCO<sub>3</sub> 微粒 7~10 种不同浓度下测得的悬浮液衰减系数和浊度值。

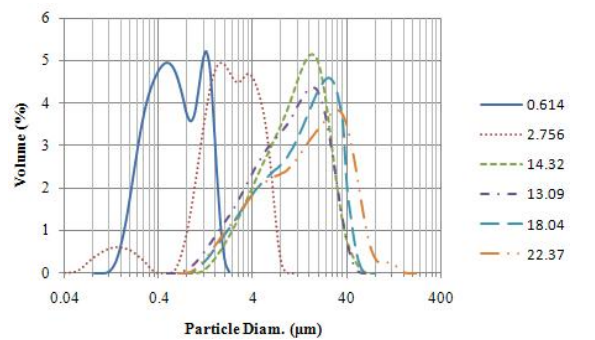


图 4 6 种 CaCO<sub>3</sub> 微粒的粒径分布图

Fig.4 The diametrical distributions for different particles

表 1 不同粒径悬浮液下测得的衰减系数和浊度数据

Table 1 The measured attenuation coefficients and turbidities for suspensions with particles of different diameters

粒径/μm	浊度/NTU	衰减系数/m <sup>-1</sup>	粒径/μm	浊度/NTU	衰减系数/m <sup>-1</sup>
0.61	0.59	0.14	13.09	2.12	0.63
	0.85	0.26		3.73	1.22
	1.09	0.43		5.89	1.85
	1.15	0.48		6.72	2.27
	1.32	0.56		8.33	2.57
	1.49	0.65		9.47	2.95
	1.70	0.76		10.60	3.36
	1.92	0.86		11.08	3.53
	2.04	0.96	18.04	1.98	0.72
	2.24	1.04		3.56	1.22
2.76	0.55	0.15		5.31	2.00
	0.91	0.32		6.79	2.40
	1.57	0.65		8.32	2.86
	2.27	0.97		9.41	3.37
	2.98	1.33		11.60	3.89
	3.97	1.67		13.23	4.33
	4.69	2.04	22.37	2.15	0.74
	5.38	2.31		3.70	1.28
14.32	1.83	0.58		5.30	1.86
	3.21	1.05		6.51	2.21
	5.04	1.58		7.89	2.59
	6.94	2.08		11.50	3.50
	8.49	2.58		12.01	3.72
	9.84	2.97			
	10.48	3.30			
	11.30	3.60			

图 5 给出了不同粒径悬浮液下衰减系数与浊度的对应关系, 图中曲线为相应的线性拟合曲线, 其线性拟合相关系数均在 0.99 以上(见表 2)。这说明: 衰减系数与浊度间确实存在线性关系, 即随着悬浮质浓度的增加, 其浊度和衰减系数同步增大; 不同粒径悬浮液所得线性拟合的斜率和截距并不相同。

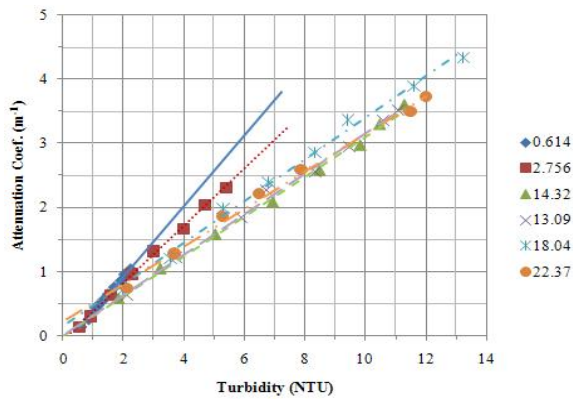


图 5 不同粒径悬浮液下衰减系数随浊度的变化曲线  
Fig.5 Attenuation coefficients vs. turbidities for suspensions with particles of different diameters

图 6 和图 7 分别给出了拟合斜率和截距随粒径的变化曲线。由图 6 的线性拟合可得斜率与粒径的对数存在较好的线性关系:

$$\text{Slope} = -0.073 \times \ln(\text{Particle diam.}) + 0.5157 \quad (5)$$
即在一定范围内, 对于同种悬浮微粒来说, 粒径越小, 衰减系数随浊度的变化越显著; 在相同浊度下, 小粒径悬浮液对光的衰减大于大粒径悬浮液, 即粒径越小, 90°方向散射光的绝对强度越大; 对于衰减系数相同的悬浮液, 粒径越小, 浊度越小, 即此时 90°方向散射光的绝对强度越小。

表 2 衰减系数与浊度的线性拟合参量  
Table 2 The linear fitting parameters for attenuation coefficients vs. turbidities

Diam./μm	Slope	Intercept	R <sup>2</sup>
0.614	0.5505	0.1764	0.9971
2.756	0.4474	0.0687	0.9979
14.32	0.3095	-0.0084	0.9967
13.09	0.3159	-0.01	0.9957
18.04	0.3247	-0.155	0.9937
22.37	0.2929	-0.2199	0.9947

图 7 表明, 线性拟合的截距与粒径间也有较好的线性关系。从实验系统误差和测量原理来看, 造成此种线性关系的原因可能包括以下两方面: ①由于实验中很难保证衰减系数测量装置的前后窗口与

激光光束保持绝对的垂直关系, 于是在无水和有水情况下, 衰减系数测量装置内部介质的折射率差会引起窗口对入射光束反射和折射角的不一致, 从而产生不同的窗口实际透光率, 最终为测量引入系统误差。但由于该误差对于所有测量数据几乎产生相同的效果, 因此它只对图 5 中曲线的截距产生影响, 而不改变曲线的斜率。②在衰减系数的测量中, 由于未将用于分散悬浮微粒的蒸馏水衰减系数从测得数据中减去, 可能造成图 5 中曲线的截距各不相同。因为实际衰减系数总是包含水体本身在内的。

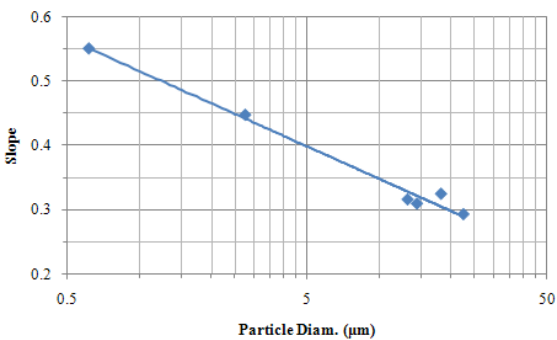


图 6 线性拟合斜率与粒径的关系 (R<sup>2</sup>=0.9861)  
Fig.6 Linear fitting slope vs. particle diam.

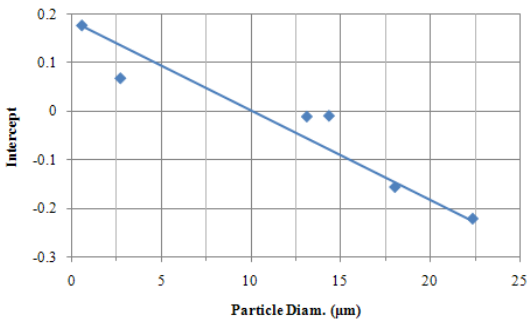


图 7 线性拟合截距与粒径的关系  
Fig.7 Linear fitting intercept vs. particle diam.

4 微粒折射率的影响

除粒径外, 不同种类悬浮微粒的折射率差异也是影响衰减系数与浊度线性参量的重要因素之一。CaCO<sub>3</sub> 微粒的平均折射率为 1.59, 为了分析折射率的影响, 进一步选用德国赢创德固赛公司 SiO<sub>2</sub> 微粒 S22LS 进行了相应测量 (SiO<sub>2</sub> 的折射率为 1.45)。图 8 给出了其粒径分布图, 测得平均粒径为 5.354 μm。

以 SiO<sub>2</sub> 为悬浮质测得的一组衰减系数和浊度数据及其拟合参量列于表 3 中。由式(5)可算得平均粒径为 5.354 μm 的 CaCO<sub>3</sub> 微粒所对应的拟合斜率约为 0.3932。即在该相同粒径下, SiO<sub>2</sub> 微粒的斜率约是 CaCO<sub>3</sub> 微粒斜率的 8 倍。可以看出: 微粒折射

率对衰减系数与浊度的拟合斜率影响很大，悬浮微粒折射率越小，其拟合斜率的平均量级就越大。从总体上看，对于悬浮质粒径和浊度相同的两种悬浮液，悬浮质本身折射率越小，其对应衰减系数就越大，即 90°方向散射光的绝对强度越大。而对于悬浮质粒径和衰减系数相同的两种悬浮液，悬浮质折射率越小，其对应浊度就越小，即 90°方向散射光的绝对强度越小。

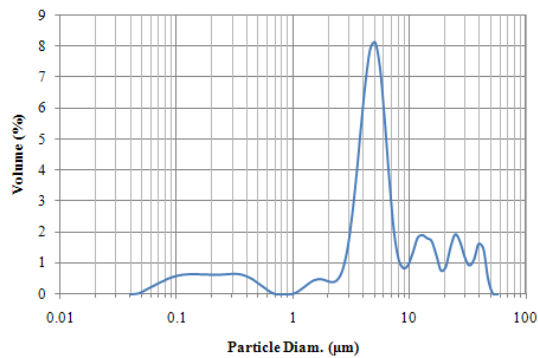


图 8 S22LS SiO<sub>2</sub> 微粒的粒径分布  
Fig.8 The diametrical distribution for SiO<sub>2</sub>

表 3 SiO<sub>2</sub> 悬浮质的衰减系数和浊度及其线性拟合参量  
Table 3 Attenuation coefs. and turbidities and their linear fitting parameters for SiO<sub>2</sub>

粒径 /μm	浊度 /NTU	衰减系数 /m <sup>-1</sup>	Slope	Intercept	R <sup>2</sup>
5.354	0.16	0.20	3.03	0.3309	0.999
	0.26	0.45			
	0.36	0.77			
	0.48	1.09			
	0.57	1.37			
	0.66	1.65			
	0.78	2.01			
	0.97	2.63			

综上所述，可以推论：在一定粒径和折射率范围内，主导水体衰减系数的主要是折射率低且粒径小的悬浮质；而主导水体浊度的却是折射率高且粒径大的悬浮质。看似清澈的水体可能会对光有较强的衰减，而看似浑浊的水体也可能对光衰减较小。

5 总结

水体衰减系数和浊度都是描述水体光学性质的重要参量，本文选取了 7 种不同粒径的不溶性微粒（6 种 CaCO<sub>3</sub> 微粒和 1 种 SiO<sub>2</sub> 微粒），采用实验方法定量研究了衰减系数与浊度的关系，讨论了粒径和折射率对两者间关系的影响。

虽然水体衰减系数与浊度有较明显的线性相关性，但尚难以直接得到由浊度仪测量值换算出衰减系数的普适关系式，对于不同类型的水体，需要进行相关的一些标定后，才能获得相应的换算关系。

参考文献：

[1] 徐啟阳, 杨坤涛, 王新兵, 等. 蓝绿激光雷达海洋探测[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.

[2] Jonasz M, Fournier G R. *Light scattering by particles in water*[M]. New York: Academic, 2007.

[3] 孟庆磊, 孙国强, 佟国香. 液体浊度测量系统[J]. 仪器仪表学报, 2005, 26(8): 252 - 253.

[4] Kirk J T O. Relationship between nephelometric turbidity and scattering coefficients in certain australian waters[J]. *Aust. J. Mar. Freshwater Res.*, 1980, 31: 1-12.

[5] 哈 希 HACH 公 司 , 2100P 浊 度 仪 [EB/OL]. <http://www.hach.com.cn/zhuoduyi/2100p.shtml>.

[6] 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)[J]. 红外技术, 2011, 33(2): 63-69

[7] 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