

## 水体绝对衰减系数现场测量方法研究

杨博闻<sup>1</sup>, 孙春生<sup>1</sup>, 韩宏伟<sup>1</sup>, 李季<sup>2</sup>

(1. 海军工程大学 兵器工程学院, 湖北 武汉 430033; 2. 湖北久之洋红外系统股份有限公司, 湖北 武汉 430033)

**摘要:**绝对衰减系数是表征海水固有光学特性的一个重要参数,现场测量水体绝对衰减系数对于水下光电探测领域具有重要价值。VIPER 高光谱衰减测量仪可以用来测量水体衰减系数,相较于 AC-S 水体衰减系数测量仪具有比较明显的成本优势。但 VIPER 只能测量水体的相对衰减系数,无法直接得到水体绝对衰减系数。针对这一问题,本文给出了一种基于 VIPER 的水体绝对衰减系数现场测量方法,推导了 VIPER 测量水体绝对衰减系数的基本公式,设计实验验证了 VIPER 测量水体绝对衰减系数的可靠性。对比实验结果表明,本文给出的基于 VIPER 的水体绝对衰减系数现场测量方法具有较好的准确性和可靠性。本文方法可使 VIPER 用于各种水下光电探测领域,实现对水体绝对衰减系数的快速定标。

**关键词:**绝对衰减系数;现场测量;VIPER;水下光电探测

**中图分类号:**TH741;TN29 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2024.07.018

## Research on the field measurement method of absolute attenuation coefficient of seawater

YANG Bo-wen<sup>1</sup>, SUN Chun-sheng<sup>1</sup>, HAN Hong-wei<sup>1</sup>, LI Ji<sup>2</sup>

(1. Department of Weaponry Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;

2. Hubei Jiuzhiyang Infrared System Co., Ltd., Wuhan 430033, China)

**Abstract:** Absolute attenuation coefficient is an important parameter to characterize the intrinsic optical properties of seawater, and its measurement in the field of water body absolute attenuation coefficient is of great value in the field of underwater photoelectricity detection. VIPER hyperspectral attenuation meter can be used to measure the attenuation coefficient of the water body, and it has a relatively obvious cost advantage compared with AC-S meter. However, VIPER can only measure the relative attenuation coefficient of the water body, and cannot directly obtain the absolute attenuation coefficient of the water body. To address this problem, this paper gives a VIPER-based field measurement of the absolute attenuation coefficient of the water body, the derivation of the basic formula for the VIPER measurement of the absolute attenuation coefficient of the water body, and the design of experiments to verify the reliability of the VIPER measurement of the absolute attenuation coefficient of the water body. Comparative experimental results show that the field measurement method of absolute attenuation coefficient of water body based on VIPER given in this paper has good accuracy and reliability. The method of this paper can make VIPER used in various underwater photoelectric detection fields, and realize the rapid calibration of the absolute attenuation coefficient of the water body.

**Keywords:** absolute attenuation coefficient; in situ measurement; VIPER; underwater photodetection

**基金项目:**海军工程大学自主科研立项项目(No. 20200357)资助。

**作者简介:**杨博闻(2001-),男,硕士研究生,主要从事光电信息处理方面的研究。E-mail:1513816850@qq.com

**通讯作者:**韩宏伟(1983-),男,博士,讲师,主要从事水下光电成像方面的研究。E-mail:powerfire@aliyun.com

**收稿日期:**2023-12-18

## 1 引言

海水的的光学特性包括仅与水体组分有关的固有光学特性和与水体组分及光照条件均有关的表观光学特性两类<sup>[1]</sup>。其中,衰减系数是表征海水固有光学特性的一个重要参数,综合反映了光波在海水受到水体本身、悬浮颗粒、可溶性有机质和浮游生物的影响程度,其测量对于水下光电成像<sup>[2-3]</sup>、水下激光通信<sup>[4-5]</sup>、水下环境监测<sup>[6-9]</sup>等许多领域都有重要价值。

水体衰减系数可以通过实验室测量和现场测量获得<sup>[5]</sup>。实验室测量常用分光光度计进行,其真实性、及时性、有效性不及现场测量。目前,能够在外场直接测量水体衰减系数的测量设备主要有 VIPER 和 AC-S 两种。美国 Wetlabs 公司生产的 AC-S 是海洋领域中使用较为广泛的水下衰减测量仪器,可以有效地测量浑浊水体和清洁水体,范围覆盖一类与二类水体,但是价格比较昂贵<sup>[10]</sup>。VIPER 是由德国 TriOS 公司生产的一种高光谱衰减测量仪,拥有 4 个可选光程,适用于不同浑浊程度的水体,成本优势比较明显。然而,不论 AC-S 还是 VIPER,其直接测出的是海水的相对衰减系数。对于水下光电成像与激光通信等领域的应用,往往需要海水的绝对衰减系数。本文给出了一种基于 VIPER 的水体绝对衰减系数现场测量方法。

## 2 VIPER 高光谱衰减测量仪

VIPER 高光谱衰减测量仪是一款水质测量设备,可用于测定 360 ~ 720 nm 波长范围内水体的光谱衰减和透射特性。该仪器采用 5 个节能 LEDs

作为光源,可以稳定地测量数据,并具有较长的使用寿命。为防止生物污染,VIPER 还采用了纳米涂层光学窗口。VIPER 拥有 4 个可选光程,其外壳用不锈钢或钛制造,可适用不同介质。

VIPER 传感器的基本测量布置如图 1 所示。

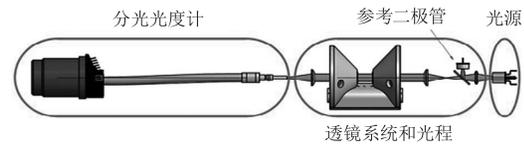


图 1 VIPER 的基本测量布置

Fig. 1 Basic measurement arrangement of VIPER

VIPER 的工作原理是,从光源发出的光在通过介质时会被介质中的粒子吸收和散射。分光光度计接收剩余的光并在指定波长范围内的不同波长处测定它的强度,记为  $I$ 。然后将其与在超纯水衰减后测得的光强  $I'_0$  进行比较,即以在超纯水中测得的光强作为基准。当波长和光束路径确定时,  $I'_0$  是一个确定值。

定义透射率  $T$  和吸收度  $AU$  为:

$$T = \frac{I}{I'_0} \quad (1)$$

$$AU = -\lg\left(\frac{I}{I'_0}\right) = -\lg T \quad (2)$$

利用  $I$  和  $I'_0$  可求出在规定波长范围内各个波长的吸收度  $AU$  的值。

定义水体的相对衰减系数为:

$$c_r = -\frac{1}{l}AU = -\frac{1}{l}\lg\left(\frac{I}{I'_0}\right) \quad (3)$$

式中,  $l$  为光程。

VIPER 的相对衰减系数测量范围如表 1 所示。

表 1 VIPER 的测量范围

Tab. 1 Measurement range of VIPER

parameter	according to	unit	factor	path length/mm				
				10	50	100	150	250
SAC436	DIN EN ISO 7887:2011_method B	1/m	-	1 ~ 250	0.2 ~ 50	0.1 ~ 25	0.06 ~ 17	0.04 ~ 10
SAC525	DIN EN ISO 7887:2011_method B	1/m	-	1 ~ 250	0.2 ~ 50	0.1 ~ 25	0.06 ~ 17	0.04 ~ 10
SAC620	DIN EN ISO 7887:2011_method B	1/m	-	1 ~ 250	0.2 ~ 50	0.1 ~ 25	0.06 ~ 17	0.04 ~ 10

由表 1 可知,对于 ISO7887-2011 国际标准中规定的水色测定波长(436 nm、525 nm 和 620 nm),当 VIPER 具有 150 mm 光程时,其可测量的最小  $AU$  值

为  $0.06 \times 0.15 = 0.009$ 。

## 3 VIPER 测量水体绝对衰减系数的基本公式

运用 VIPER 测量可得吸收度  $AU$  和相对衰减

系数。而在水下光电成像实验的水体快速定标中,需要使用绝对衰减系数  $c$ , 即反映包含水体本身在内的全部水体成分对光的衰减效应。因此,要得到绝对衰减系数,需经过一系列的换算。下面推导 VIPER 测量水体绝对衰减系数的基本公式。

一定体积的水具有明确的吸收和散射特性<sup>[11]</sup>。不妨设波长为  $\lambda$ , 光谱辐射功率为  $P_i(\lambda)$  的单色光束照射,经水体吸收、散射后,沿原方向传输的辐射功率为  $P_t(\lambda)$ 。

假定散射过程中未发生波长变化,对于波长为  $\lambda$  的单色光通过厚度为  $l$  的水体,由朗伯-比尔定律,可得:

$$c = -\frac{1}{l} \ln \frac{P_t(\lambda)}{P_i(\lambda)} \quad (4)$$

利用光强来表征,则上式可以写为:

$$c = -\frac{1}{l} \ln \frac{I}{I_0} \quad (5)$$

其中,  $I$  为现场测量的透射光强;  $I_0$  为初始光强。

由公式(2)可得:

$$AU = -\lg\left(\frac{I}{I_0}\right) = -\lg\left(\frac{I}{I_0} \times \frac{I_0}{I_0'}\right) \quad (6)$$

进一步地:

$$10^{-AU} = \frac{I}{I_0} \times \frac{I_0}{I_0'} \quad (7)$$

从而:

$$\begin{aligned} \ln(10^{-AU}) &= \ln\left(\frac{I}{I_0} \times \frac{I_0}{I_0'}\right) \\ &= \ln\left(\frac{I}{I_0}\right) - \ln\left(\frac{I_0'}{I_0}\right) \end{aligned} \quad (8)$$

$$-\frac{\ln(10^{-AU})}{l} = -\frac{\ln\left(\frac{I}{I_0}\right)}{l} - \left[-\frac{\ln\left(\frac{I_0'}{I_0}\right)}{l}\right] \quad (9)$$

即:

$$-\frac{\ln\left(\frac{I}{I_0}\right)}{l} = \left[-\frac{\ln\left(\frac{I_0'}{I_0}\right)}{l}\right] - \frac{\ln(10^{-AU})}{l} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} c &= c_{\text{water}} - \frac{\ln(10^{-AU})}{l} \\ &= c_{\text{water}} + AU \times \frac{\ln 10}{l} \end{aligned} \quad (11)$$

当  $l$  取 150 mm 时,式(11)变为:

$$c = c_{\text{water}} + 15.35AU \quad (12)$$

式中,  $c_{\text{water}}$  代表水体本身的绝对衰减系数,可查阅表 2<sup>[12-14]</sup> 得到。

表 2 纯水吸收衰减系数 ( $T=22\text{ }^\circ\text{C}$ )

Tab. 2 Absorption attenuation coefficients for pure water ( $T=22\text{ }^\circ\text{C}$ )

$\lambda/\text{nm}$	$a/\text{m}^{-1}$	$b/\text{m}^{-1}$	$c/\text{m}^{-1}$	$\lambda/\text{nm}$	$a/\text{m}^{-1}$	$b/\text{m}^{-1}$	$c/\text{m}^{-1}$
360	0.0066	0.0092	0.0158	545	0.0511	0.0015	0.0526
365	0.0063	0.0086	0.0149	550	0.0565	0.0015	0.058
370	0.006	0.0082	0.0142	555	0.0596	0.0014	0.061
375	0.0056	0.0077	0.0133	560	0.0619	0.0013	0.0632
380	0.0052	0.0073	0.0125	565	0.0642	0.0013	0.0655
385	0.005	0.0069	0.0119	570	0.0695	0.0013	0.0708
390	0.0048	0.0066	0.0114	575	0.0772	0.0012	0.0784
395	0.0047	0.0061	0.0108	580	0.0896	0.0012	0.0908
400	0.0046	0.0058	0.0104	585	0.11	0.0011	0.1111
405	0.0046	0.0055	0.0101	590	0.1351	0.0011	0.1362
410	0.0046	0.0052	0.0098	595	0.1672	0.001	0.1682
415	0.0046	0.005	0.0096	600	0.2224	0.001	0.2234
420	0.00454	0.0047	0.00924	605	0.2577	0.001	0.2587
425	0.00478	0.0045	0.00928	610	0.2644	0.0009	0.2653
430	0.00495	0.0043	0.00925	615	0.2678	0.0009	0.2687
435	0.0053	0.0041	0.0094	620	0.2755	0.0009	0.2764

续表 2 纯水吸收衰减系数 ( $T = 22\text{ }^{\circ}\text{C}$ )Tab. 2 Absorption attenuation coefficients for pure water ( $T = 22\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

$\lambda/\text{nm}$	$a/\text{m}^{-1}$	$b/\text{m}^{-1}$	$c/\text{m}^{-1}$	$\lambda/\text{nm}$	$a/\text{m}^{-1}$	$b/\text{m}^{-1}$	$c/\text{m}^{-1}$
440	0.00635	0.0039	0.01025	625	0.2834	0.0008	0.2842
445	0.00751	0.0037	0.01121	630	0.2916	0.0008	0.2924
450	0.00922	0.0035	0.01272	635	0.3012	0.0008	0.302
455	0.00962	0.0033	0.01292	640	0.3108	0.0008	0.3116
460	0.00979	0.0032	0.01299	645	0.325	0.0007	0.3257
465	0.01011	0.003	0.01311	650	0.34	0.0007	0.3407
470	0.0106	0.0029	0.0135	655	0.371	0.0007	0.3717
475	0.0114	0.0028	0.0142	660	0.41	0.0007	0.4107
480	0.0127	0.0027	0.0154	665	0.429	0.0006	0.4296
485	0.0136	0.0025	0.0161	670	0.439	0.0006	0.4396
490	0.015	0.0024	0.0174	675	0.448	0.0006	0.4486
495	0.0173	0.0023	0.0196	680	0.465	0.0006	0.4656
500	0.0204	0.0022	0.0226	685	0.486	0.0006	0.4866
505	0.0256	0.0021	0.0277	690	0.516	0.0006	0.5166
510	0.0325	0.002	0.0345	695	0.559	0.0005	0.5595
515	0.0396	0.002	0.0416	700	0.624	0.0005	0.6245
520	0.0409	0.0018	0.0428	705	0.704	0.0005	0.7045
525	0.0417	0.0018	0.0435	710	0.827	0.0005	0.8275
530	0.0434	0.0017	0.0451	715	1.007	0.0005	1.0075
535	0.0452	0.0017	0.0469	720	1.231	0.0005	1.2315
540	0.0474	0.0016	0.049	725	1.489	0.0004	1.4894

$c$  则称为样本水体的绝对衰减系数。由上式可知,只需知道  $AU$  的值,便可得到样本水体的绝对衰减系数,上式即为 VIPER 测量水体绝对衰减系数的基本公式。

#### 4 实验设计与结果分析

采用换算公式, VIPER 可以测得水体的绝对衰减系数。下面进行 VIPER 测量水体绝对衰减系数的实验分析:首先设计实验检验 VIPER 的测量可靠性,再利用 VIPER 进行典型水体衰减系数测量,并结合水下光电成像实验分析 VIPER 测量的有效性。

##### 4.1 VIPER 与 AC-S 的测量一致性实验

AC-S 作为目前作为使用较为广泛的衰减测量仪器,具有稳定性好、测量精度高的特点<sup>[15]</sup>。因此用 AC-S 和 VIPER 进行对比实验,验证 VIPER 的测量可靠性。

本次实验共对以下几种水体进行测量,分别为:往自来水中添加不同量的氢氧化镁所形成的不同浓

度的溶液(分别记为氢氧化镁溶液 1、氢氧化镁溶液 2、氢氧化镁溶液 3)、航模池水体。航模池为人工挖掘的封闭水池。

将设备固定在水下支架上并通过水下电缆连接,放入实验水体中。接通电源后根据预设的测量间隔进行 10 min 的测量,之后断开电源重新连接电脑读取数据。数据处理时,将 VIPER 波长插值到与 AC-S 波长一致后进行对比。

图 2 至图 5 给出了分别使用 AC-S 和 VIPER 测得的四种水体的相对衰减系数。由图可知, VIPER 得到的结果与 AC-S 得到的结果吻合度较好。

对 VIPER 与 AC-S 的测量结果将进行误差分析,将 VIPER 测量得到的水体相对衰减系数记为  $c_{\text{VIPER}}$ ,将 AC-S 测量得到的水体相对衰减系数记为  $c_{\text{AC-S}}$ 。定义相对误差为:

$$\delta = \frac{c_{\text{VIPER}} - c_{\text{AC-S}}}{c_{\text{AC-S}}} \times 100\% \quad (13)$$

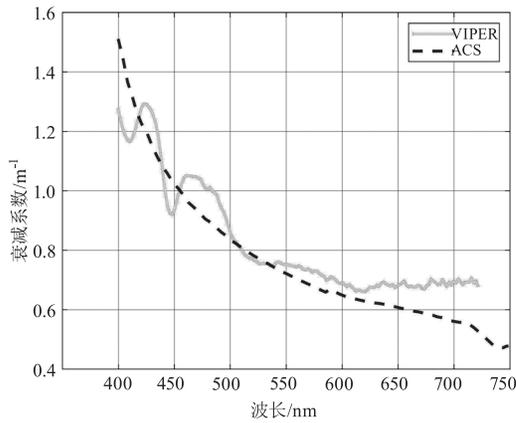


图2 氢氧化镁1 相对衰减系数对比图

Fig. 2 Comparison of attenuation coefficients of magnesium hydroxide 1

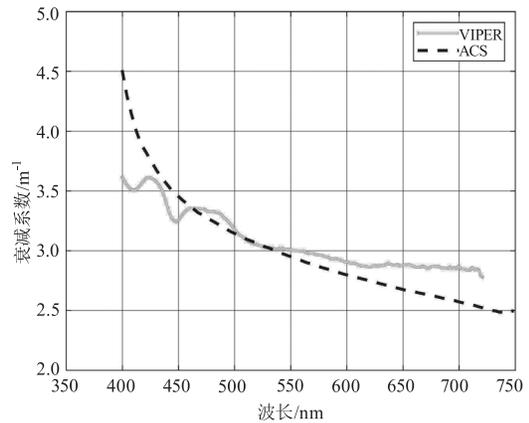


图4 氢氧化镁3 相对衰减系数对比图

Fig. 4 Comparison of attenuation coefficients of magnesium hydroxide 3

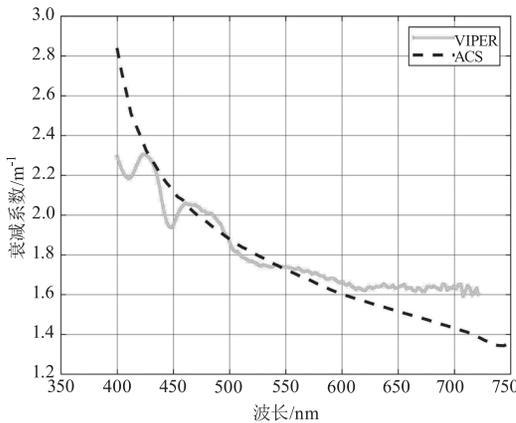


图3 氢氧化镁2 相对衰减系数对比图

Fig. 3 Comparison of attenuation coefficients of magnesium hydroxide 2

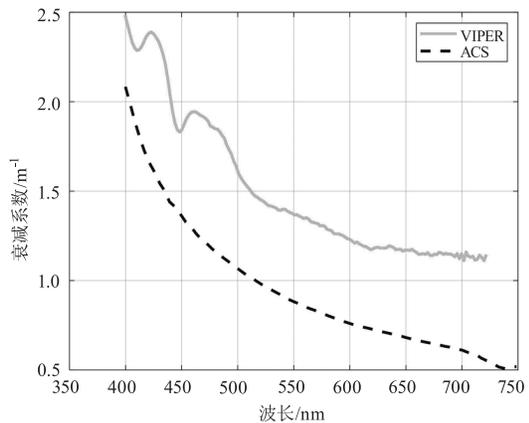


图5 航模池相对衰减系数对比图

Fig. 5 Comparison of the attenuation coefficients of the aeromodelling cell

对实验数据进行相对误差计算,两种仪器在部分波长(取水下光电成像常用波段范围)的下测量得到的相对误差如表3所示。

在测量氢氧化镁溶液1、2、3时,当波长在500~570 nm范围内时,相对误差在7%以内。这表明,当测量衰减系数较大的水体时,VIPER与AC-S结果相近。

表3 不同水体相对衰减系数部分波长相对误差表

Tab. 3 Relative errors for selected wavelengths of the attenuation coefficients for different water bodies

波长/nm	相对误差/%				
	自来水	氢氧化镁溶液1	氢氧化镁溶液2	氢氧化镁溶液3	航模池
501.2	3.27	1.94	-1.53	0.70	50.07
506.2	0.49	0.04	-2.07	0.15	48.70
511.4	-1.83	-1.45	-2.69	-0.27	47.53
516.5	-3.91	-2.25	-2.94	-0.53	47.22
521.6	-3.94	-2.00	-2.46	-0.38	48.09
526.3	-3.49	-2.14	-2.58	-0.20	48.33
531	-1.28	-0.70	-1.84	0.11	49.60
535.6	-0.84	-0.08	-1.44	0.46	50.38
540.2	3.73	2.07	-0.24	1.31	52.98
544.9	5.84	3.82	0.17	1.57	54.65

续表 3 不同水体相对衰减系数部分波长相对误差表

Tab. 3 Relative errors for selected wavelengths of the attenuation coefficients for different water bodies

波长/nm	相对误差/%				
	自来水	氢氧化镁溶液 1	氢氧化镁溶液 2	氢氧化镁溶液 3	航模池
549.7	6.90	4.22	0.82	1.92	55.28
554.5	8.27	4.88	1.13	2.29	56.39
559.4	9.53	5.72	1.60	2.60	57.66
563.9	10.84	6.42	1.89	2.87	58.54
568.8	11.70	7.04	2.35	3.09	58.64
573.2	11.48	6.68	2.16	3.10	59.04

在测量航模池水体时, VIPER 与 AC-S 趋势相对吻合, 当波长在 500 ~ 570 nm 范围内误差在 47% ~ 59% 范围内波动, 虽然数值较大, 但总体比较平稳。这可能是由于航模池水体具有一定盐度, 而两个仪器均未做盐度校正。而由于仪器的不同, 二者的盐度校正系数有差别, 导致未进行盐度校正的数据相对误差较大。

#### 4.2 典型水体绝对衰减系数测量

首先在实验室内对自来水的绝对衰减系数进行测量, 并结合水下被动微光成像实验对测量结果进行分析。

实验室水池长度为 7 m, 内壁三面用黑色天鹅绒包裹以减少池壁反射。将该水池注满自来水。在完成纯水标定后, 使用 VIPER 对该水池内的自来水绝对衰减系数进行测量。为方便数据处理, 利用 Python 语言编写可视化软件, 该软件可利用 VIPER 测量的数据直接计算得到水体的绝对衰减系数, 并生成水体衰减系数与波长的关系图像。测量结果如图 6 所示。

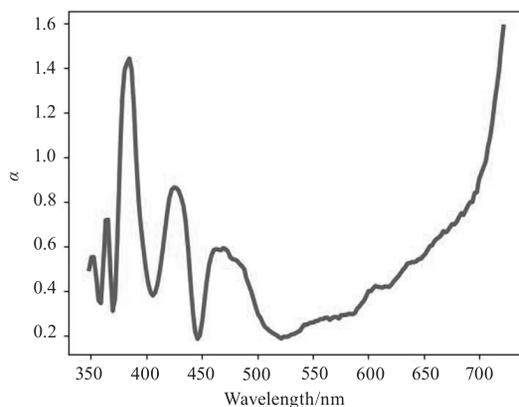


图 6 VIPER 测量的自来水的绝对衰减系数

Fig. 6 Absolute attenuation coefficient of tap water measured by VIPER

可以看到, 在水下光电成像常用波长 532 nm, 自来水的绝对衰减系数为  $0.206 \text{ m}^{-1}$ 。

利用黑白目标靶板和低照度 CMOS 在上述水池内开展水下被动微光成像。其中, 低照度 CMOS 浸入水中且固定于水池一侧, 黑白目标靶板同样侵入水中并从另一侧逐渐向探测器端移动, 直到通过低照度 CMOS 的输出图像刚刚可以发现目标为止。测出此时目标靶板和探测器之间的距离, 即为最大探测距离。实验结果如图 7 所示, 此时, 利用自制水下照度计测得的目标处向探测器端的照度为  $2 \times 10^{-5} \text{ lx}$ , 而最大探测距离为 5.15 m, 按 532 nm 的绝对衰减系数计算, 等于 1.06 倍衰减长度。这一倍数关系与现有文献中关于水下被动成像的作用距离描述基本相符。



图 7 最大探测距离处的目标图像

Fig. 7 Target image at maximum detection distance

接着, 利用 VIPER 对典型海域的绝对衰减系数进行测量, 并结合水下激光距离选通成像实验分析测量结果。选择的海域分别为海南省三亚市分界洲海域离岸 200 m 处和后海海域, 测量时间为 2023 年 1 月。

将 VIPER 衰减测量仪、潜水泵、水下电池依次固定在水下支架上, 并通过水下电缆连接, 分别对分界洲和后海海域水体进行测试, 接通电源后根据预

设的测量间隔进行 10 min 的测量,之后断开电源重新连接电脑读取数据。

两个海域水体绝对衰减系数的测量结果如图 8、图 9 所示。

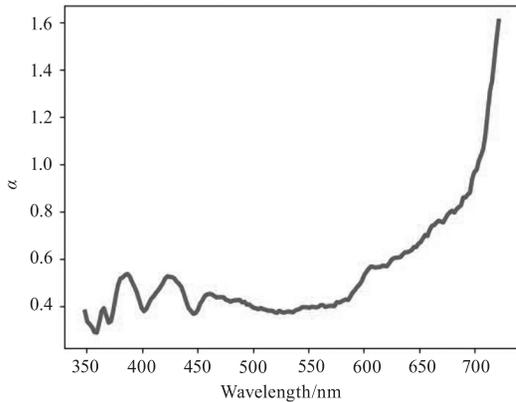


图 8 分界洲水体绝对衰减系数与波长的关系

Fig. 8 Attenuation coefficients versus wavelength for "Fenjiezhou" waters

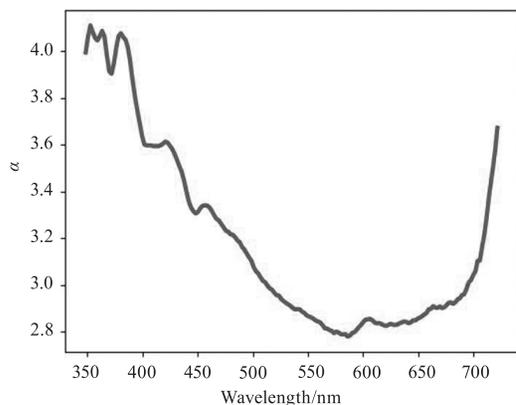


图 9 后海水体绝对衰减系数与波长的关系

Fig. 9 Attenuation coefficients versus wavelength for "Houhai" waters

由图可知,对于水下光电成像常用的 532 nm 波长,分界洲海域水体绝对衰减系数为  $0.63 \text{ m}^{-1}$ ,而后海海域水体绝对衰减系数为  $2.85 \text{ m}^{-1}$ ,后者为前者的 4.52 倍。某水下激光距离选通成像系统样机测试中,在分界洲海域的作用距离 5 倍于后海海域的作用距离,与两者绝对衰减系数的相对关系基本相似。

以上实验室和外场的实验,侧面说明了本文水体绝对衰减系数标定方法的正确性。

## 5 结 语

本文给出了一种基于 VIPER 的水体绝对衰减系数测量方法。首先针对 VIPER 测量水体参数的特点,推导出利用 VIPER 测量水体绝对衰减系数的基本公式;然后与 AC-S 测量结果比较实验,说明

VIPER 的可靠性;并利用 VIPER 和本文方法对典型水体的绝对衰减系数进行现场测量,并结合水下光电成像实验侧面证明了本文方法的有效性。

## 参考文献:

- [1] Chen Xiangzi, Yun Ziping. Definition and measurement methods of some Intrinsic optical parameters in marine optics[J]. Journal of Hainan Tropical Ocean University, 2022, 29(5): 97-105. (in Chinese)  
陈祥子, 负子平. 海洋光学中若干固有光学参数的定义及测量方法[J]. 海南热带海洋学院学报, 2022, 29(5): 97-105.
- [2] Shi Feng, Cheng Hongchang, Yan Lei, et al. Advances in underwater photoelectric imaging technology[J]. Infrared Technology, 2023, 45(10): 1066-1083. (in Chinese)  
石峰, 程宏昌, 闫磊, 等. 水下光电成像技术研究进展[J]. 红外技术, 2023, 45(10): 1066-1083.
- [3] He Dahua, Zhang Ruiwen, Li Yangyang, et al. Underwater electro-optical imaging model[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2023, 21(5): 107-116. (in Chinese)  
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.
- [4] Zeng Fengjiao, Yang Kangjian, Yan Xu, et al. Research progress on underwater laser communication systems[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(3): 23-34. (in Chinese)  
曾凤娇, 杨康建, 晏旭, 等. 水下激光通信系统研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(3): 23-34.
- [5] Zhao Liancheng, Mao Zhihua, Tao Bangyi, et al. Analysis of uncertainties associated to underwater hyperspectral attenuation measurements[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(4): 32-40. (in Chinese)  
赵连成, 毛志华, 陶邦一, 等. 水下高光谱衰减测量的不确定度分析[J]. 光学学报, 2015, 35(4): 32-40.
- [6] Zhu Yipu, Du Xiujuan. Review and prospect of underwater environmental monitoring system[J]. Computer Engineering and Applications, 2023, 59(10): 65-74. (in Chinese)  
朱银璞, 杜秀娟. 水下环境监测系统综述与展望[J]. 计算机工程与应用, 2023, 59(10): 65-74.
- [7] Hua Nali, Chen Xiaogang, Song Wenen, et al. Stereoscopic perception system for marine environment monitoring[J]. China Offshore Platform, 2021, 36(1): 78-83. (in Chinese)  
化娜丽, 陈小刚, 陈萍, 等. 海洋环境监测立体感知体系[J]. 中国海洋平台, 2021, 36(1): 78-83.
- [8] Zhang Yunhai. Overview on development of marine environment monitoring equipment and technologies[J]. Dig-

- ital Ocean & Underwater Warfare, 2018, 1(1): 7 - 14.  
(in Chinese)  
张云海. 海洋环境监测装备技术发展综述[J]. 数字海洋与水下攻防, 2018, 1(1): 7 - 14.
- [9] Shi Shengwei, Wang Jiang'an, Jiang Xingzhou, et al. A new measurement study of attenuation coefficient using multi-angle backscattering signals[J]. Laser & Infrared, 2008, 38(5): 417 - 420. (in Chinese)  
石晟玮, 王江安, 蒋兴舟, 等. 海水衰减系数的多角度后向散射测量技术研究[J]. 激光与红外, 2008, 38(5): 417 - 420.
- [10] Wang Xiaofei, Mao Zhihua, Ding Youzhan. Measurement and data-processing of absorption and attenuation coefficients by Ac-S in east China sea[C]//Editorial Office of Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009: 51 - 53. (in Chinese)  
王小飞, 毛志华, 丁又专. 东海海区 AC-S 测量与数据处理[C]//第七届全国信息获取与处理学术会议, 2009: 51 - 53.
- [11] Liu Wenjun, Tian Zhaoshuo, Pan Yuzhai. Marine optics [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2022. (in Chinese)  
刘文军, 田兆硕, 潘玉寨. 海洋光学[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2022.
- [12] Morel A, Y Huot, B Gentili, et al. Franz 2007: examining the consistency of products derived from various ocean color sensors in open ocean (Case 1) waters in the perspective of a multi-sensor approach [J]. Remote Sens. Env., 111(1): 69 - 88.
- [13] Pope R. M, Fry E. S; Absorption spectrum (380 - 700 nm) of pure water. II. Integrating cavity measurements [J]. Appl. Opt., 1997, 36(33): 8710 - 8723.
- [14] Morel A. Optical properties of pure water and pure sea water[M]. N. G. Jerlov, E. S. Nielsen, Optical Aspects of Oceanography, New York: Elsevier, 1974: 1 - 23.
- [15] Zhang Xuan, Tao Bangyi, He Xianqiang. Data processing technique for hyperspectral absorption and attenuation meter[J]. Acta Photonic Sinica, 2010, 39(S1): 59 - 63. (in Chinese)  
张翮, 陶邦一, 何贤强. 高光谱水体吸收 - 衰减测量仪 (AC - S) 数据处理技术[J]. 光子学报, 2010, 39(S1): 59 - 63.