

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2020.01.003

海洋水体光学性质测量技术研究进展

张亭禄, 陈树果, 薛程

(中国海洋大学海洋技术系, 山东 青岛 266100)

摘 要: 海洋水体光学性质测量是海洋光学理论发展的基础, 水体光学性质测量技术的提高, 也大大带动了其它海洋光学技术及其应用的发展。回顾历史, 光电技术和光谱技术是水体光学测量技术的主要推动力, 海洋光辐射传输理论的发展及水色遥感是水体光学测量技术的主要牵引力。论文重点对水体光学性质中基础量的测量原理、方法及主要产品做了系统的介绍, 其中包括光谱辐亮度和光谱辐照度的测量方法、水体光谱吸收的测量方法以及光谱散射性的测量方法等。最后, 给出了水体光学性质测量技术未来的发展方向, 为从事水体光学性质仪器开发、相关海洋光技术开发和用户等提供参考。

关键词: 水体光学性质; 测量技术; 辐亮度; 辐照度; 吸收; 散射

中图分类号: TP79

文献标识码: A

文章编号: 1673-6141(2020)01-0023-017

Progress of Measurement Technology for Marine Water Optics Properties

ZHANG Tinglu, CHEN Shuguo, XUE Cheng

(Department of Marine Technology, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: The measurement of optical properties of ocean water body is the basis of the development of the theory of marine optics, and the improvement of the measurement technology of optical properties has greatly promoted the development of other optical technologies and their applications. Looking back on the history, photoelectric technology and spectral technology are the main driving force of water optical measurement technology, and the development of radiate transfer theory and water color remote sensing are the main traction force of optical measurement technology. The measurement principle, method and typical products of optical properties of water body are introduced systematically, including the measurement methods of spectral radiance and spectral irradiance, spectral absorption and spectral scattering properties. Finally, the future development direction of optical property measurement is given, which can provide reference for the development of water optical instruments, related ocean optical technology and their users.

Key words: optical properties of water body; measurement technology; radiance; irradiance; absorption; scattering

基金项目: Supported by NSFC — Shandong Joint Fund for Marine Science Research Centers (国家自然科学基金 - 山东省人民政府联合资助海洋科学研究中心项目, U1406404, U1406405), National Natural Science Foundation of China (国家自然科学基金, 41276041)

作者简介: 张亭禄 (1965 -), 男, 山东日照人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事海洋光学及光学遥感等方面的研究和教学。

E-mail: zhangtl@ouc.edu.cn

收稿日期: 2019-12-09; **修改日期:** 2019-12-17

1 引 言

海洋水体光学性质的测量技术是海洋光学及其应用发展的基础推动力,海洋光学每一次大发展都离不开光学性质测量技术的进步。另外,海洋光学测量技术的重要进展是在新技术(尤其是光电技术和光谱技术)和实际应用需求的推动下完成的。

上世纪初,摄影方法应用于海洋光学测量是精确定量测量海洋光学性质的开端。光电效应的发现以及光电管的发明都是光学上的重大科技进步,它们很快被用于水下光辐射测量以及光学性质确定等方面的研究^[1-3]。这些研究一方面为海洋光学性质的测量方法奠定了基础,另一方面,获取的海洋光学性质数据为光与海水的相互作用理论的认识提供了经验基础,并以此建立了海水的光学分类方案^[4-5]。

上世纪60年代,激光的发现,对光以及光与海水的相互作用的研究产生了重大影响,强有力地促进了测量海洋光学性质的仪器和方法的发展。各国军方(尤其是美国军方)对激光水下应用的关注,为研究海洋中光的传播以及开发测量海洋光学性质的新型仪器提供了重要的经费来源。在充足资金的支持下,十年之内在海洋光学性质的测量和认识上取得巨大的进步^[6-7]。尽管冷战结束后,军方中断了大量经费的资助,但是基于以上研究基础,陆续开发出了多款商品化的海洋光学测量仪器^[8],可方便地获取高质量的水体光学数据,为海洋辐射传输研究提供了强有力的工具^[9]。

上世纪80年代发展起来的水色卫星遥感技术,引起了人们对海洋光学性质的广泛兴趣。海水颜色的变化和分布是由上表层水体中的物质所决定的,如浮游植物、非色素颗粒物及可溶有机物等。为了从水色数据中确定这些物质的浓度,需要了解它们的光学性质以及它们对光传输过程的影响。在此需求的推动下,大量新的较高性能的光学测量仪器得以开发,获取了先前不能被测量的海洋光学性质数据^[10]。这些光学数据可以提供海洋的一些基本信息,如颗粒物的浓度、类型、粒径分布、初级生产力、水体混浊度等。另外,光学性质数据与物理、生物、化学和地质等数据具有相关性。因此,当前海洋光学研究重点是把光学性质测量技术作为一种重要工具去研究物理海洋学、化学海洋学、生物海洋学及地质海洋学等^[11-13]。海洋光学测量技术的发展对于近海水域的生态系统、海洋环境状态、碳循环、热平衡和全球气候变化的研究具有重要的推动作用。

海洋光学中,用于描述水体介质中光传输特性的物理量主要有两类^[14-15],即固有光学性质和表观光学性质。固有光学性质指只依赖于水体介质,而与水体介质中环境光场无关的特性,如光束吸收系数、体积散射函数、光束衰减系数、单次散射几率和后向散射系数等,其中的基础量是光束吸收系数和体积散射函数。表观光学性质指不仅依赖于水体介质,同时依赖于环境光场几何结构的特征。常用的表观光学性质包括辐照度反射率、遥感反射比、漫射衰减系数及平均余弦等。表观光学性质的测量是通过光谱辐亮度和光谱辐照度间接测量获取的,是被动测量方式。固有光学性质的测量是主动方式,用于测量固有光学性质仪器的种类包括:光谱吸收测量仪、光谱衰减测量仪、体积散射函数测量仪及光谱后向散射测量仪等。

本文主要针对目前光学性质测量仪器的基本测量原理、技术发展及未来的方向等进行较为系统的介绍,为从事水体光学性质仪器开发及使用者提供参考。

2 海洋光辐射量的测量

海洋光学中常用的辐射量是光谱辐亮度和光谱辐照度,其中光谱辐亮度是最基本的物理量,辐照度及其它辐射量可由辐亮度导出。另外,已知辐亮度和辐照度可以导出表观光学性质参数,详细方法可参考相关文献^[16]。

理论上,光谱辐亮度(单位: $\text{Js}^{-1}\text{m}^{-2}\text{sr}^{-1}\text{nm}^{-1}$)定义^[15]为

$$L(\theta, \phi, \lambda) \equiv \frac{d^4 Q}{dt dA d\Omega d\lambda}, \quad (1)$$

即单位时间单位面积单位立体角单位波长上的辐射能量。

根据辐亮度的定义, 用于测量光谱辐亮度的辐射计测量原理如图 1 所示。该仪器的接收视场立体角 $\Delta\Omega$, 光电接收器接收面积 ΔS , 接收滤色器的中心波长 λ , 带宽 $\Delta\lambda$, 仪器的朝向 (θ, ϕ) 。如果在 Δt 间隔内, ΔQ 大小的辐射能量照射到 ΔA 大小的接受面上, 则测量的光谱辐亮度 (单位: $\text{Js}^{-1}\text{m}^{-2}\text{sr}^{-1}\text{nm}^{-1}$) 为

$$L(\theta, \phi, \lambda) \equiv \frac{\Delta Q}{\Delta t \Delta A \Delta \Omega \Delta \lambda}. \quad (2)$$

在设计此类仪器时, 必须保证 Δt , ΔA , $\Delta\Omega$ 和 $\Delta\lambda$ 取值足够小, 测量的辐亮度才有物理意义。这些量的典型数值: $\Delta t: 10^{-3} \sim 10^3 \text{ s}$, $\Delta A: 10^{-4} \sim 10^{-3} \text{ m}^2$, $\Delta\Omega: 10^{-2} \sim 10^{-1} \text{ sr}$, $\Delta\lambda: 1 \sim 20 \text{ nm}$ 。

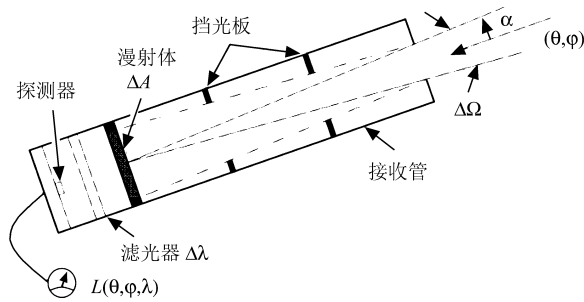


图 1 光谱辐亮度测量结构示意图 [15]

Fig.1 Structure diagram of spectral radiance measurement [15]

海洋光学中, 常用的辐照度参数包括平面辐照度和标量辐照度, 又分别包括向下的平面辐照度和向上的平面辐照度以及向下的标量辐照度和向上的标量辐照度。在实际应用中, 如果不特别说明, 辐照度一般指平面辐照度。

理论上, 向下光谱辐照度 (单位: $\text{Js}^{-1}\text{m}^{-2}\text{nm}^{-1}$) 的定义 [15] 为

$$E_d(\lambda) \equiv \frac{d^3 Q_d}{dt dA d\lambda}, \quad (3)$$

即单位时间、单位面积和单位波长向下的辐射能量。

同样也可定义向上的光谱辐照度为

$$E_u(\lambda) \equiv \frac{d^3 Q_u}{dt dA d\lambda}, \quad (4)$$

即单位时间单位面积和单位波长向上的辐射能量。

用于测量光谱辐照度的辐射计测量原理如图 2 所示, 与光谱辐亮度测量的差别是移去图 1 中的接收管, 这样接收器可以接收整个半球所有方向的光子。当把该仪器接收面朝上使用, 接收向上传输的光子, 则测量的为向下光谱辐照度 E_d 为

$$E_d(\lambda) \equiv \frac{\Delta Q_d}{\Delta t \Delta A \Delta \lambda}. \quad (5)$$

当把该仪器接收面朝下使用时, 接收向上传输的光子, 则测量的是向上光谱辐照度 E_u 为

$$E_u(\lambda) \equiv \frac{\Delta Q}{\Delta t \Delta A \Delta \lambda}. \quad (6)$$

在图 2 的测量系统中, 接收面是一平面, 因此这种方式测量的光谱辐照度也称为平面光谱辐照度。

根据辐照度定义,可以得到辐照度与辐亮度的关系。在某个水平面上,下行辐照度是所有向下传输辐亮度的加权积分,即

$$E_d = \int_{\Xi_d} L(\theta, \phi) |\cos \theta| d\Omega = \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi/2} L(\theta, \phi) |\cos \theta| \sin \theta d\theta d\phi, \quad (7)$$

海洋光学中,坐标系的选择一般取平均水面为零点 $Z = 0$,深度 Z 垂直向下为正。 Ξ_d 代表向下半球,方向 (θ, ϕ) 的范围: $0 \leq \theta \leq \pi/2, 0 \leq \phi \leq 2\pi$ 。

同样上行辐照度则是向上传输的所有辐亮度的加权积分为

$$E_u = \int_{\Xi_u} L(\theta, \phi) |\cos \theta| d\Omega = \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=\pi/2}^{\pi} L(\theta, \phi) |\cos \theta| \sin \theta d\theta d\phi. \quad (8)$$

其中, Ξ_u 代表向上半球,方向 (θ, ϕ) 的范围: $\pi/2 \leq \theta \leq \pi, 0 \leq \phi \leq 2\pi$ 。

在测量平面光谱辐照度时,探测器上接受的不同方向光子贡献的权重不同。如果一个光探测器(如图3所示)对任意方向上 (θ, ϕ) 的光子都具有相同的敏感性,当该探测器面朝上用以收集向下运动的光子时,那探测器输出的就是光谱标量辐照度 $E_{od}(\lambda)$ 。这样的探测器可以把向下半球 Ξ_d 内所有方向的辐射积分起来。因此, $E_{od}(\lambda)$ 与 $L(\theta, \phi, \lambda)$ 的关系为

$$E_{od}(\lambda) = \int_{\Xi_d} L(\theta, \phi, \lambda) d\Omega = \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi/2} L(z, \theta, \phi, \lambda) \sin \theta d\phi d\theta. \quad (9)$$

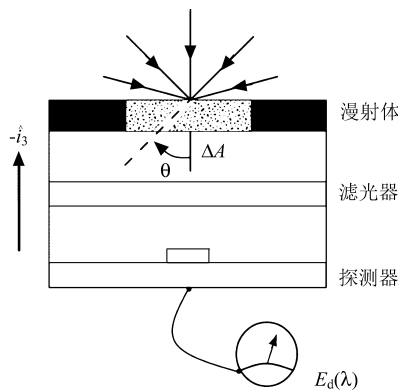


图 2 光谱辐照度测量结构示意图^[15]

Fig.2 Structure diagram of spectral irradiance measurement^[15]

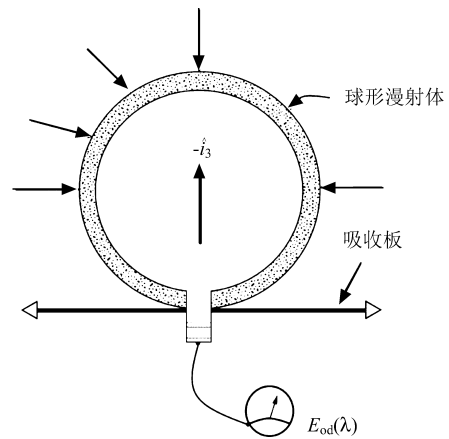


图 3 测量总标量辐照度结构示意图^[15]

Fig.3 Structure diagram of spectral scale-irradiance measurement^[15]

如果相同的仪器面朝下,探测向上运动的光子,那么测量的就是向上的光谱标量辐照度 $E_{ou}(\lambda)$ 。

$$E_{ou}(\lambda) = \int_{\Xi_u} L(\theta, \phi, \lambda) d\Omega = \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=\pi/2}^{\pi} L(z, \theta, \phi, \lambda) \sin \theta d\phi d\theta. \quad (10)$$

总的光谱标量辐照度即为向上和向下之和

$$E_o(\lambda) = E_{ou}(\lambda) + E_{od}(\lambda) = \int_{\Xi} L(\theta, \phi, \lambda) d\Omega = \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} L(\theta, \phi, \lambda) \sin \theta d\phi d\theta, \quad (11)$$

该参数通常用于光合作用的研究中, 光合作用吸收的光不依赖于光子的传输方向。

目前海洋辐射计分为多光谱和高光谱辐射计, 多光谱辐射计光谱测量通常采用干涉滤光片, 高光谱辐射计一般采用光栅光谱仪作为滤光器。海洋光谱辐射计用于测量海中的光谱辐射, 目前大部分应用针对水色遥感反演及印证, 另有部分应用针对海洋生态系统的研究等, 不同的应用对辐射计性能的要求不同。用于水色产品印证, 特别是光谱离水辐亮度和光谱遥感反射比等参数的印证, 对光谱辐射计的要求主要体现在光谱范围、分辨率、信噪比和饱和度等方面。以下分别介绍水色遥感产品印证对多光谱和高光谱辐射计的性能要求^[17]。

多光谱辐射计的光谱波段设置, 包括波长范围、中心波长和带宽应与被检验的卫星载荷一致, 而且滤光片的带外响应不大于归一化峰值透射率的 10^{-4} 。表 1 给出了目前国际主流水色卫星载荷的波段设置, 中心波长和带宽 (nm), 其中 COCTS 是我国 HY-1C 星上的水色水温扫描仪, VIIRS 是美国 SNPP 卫星水色传感器, OLCI 是欧空局 Sentinel-3 星上的水色传感器, GOCI 是韩国 COMS 卫星上的水色传感器。

表 1 目前主流水色传感器通道中心波长及带宽

Table 1 Central wavelength and bandwidth character of main current ocean-color sensor

MODIS	VIIRS	OLCI	GOCI	COCTS
		400(15)		
412(15)	410(20)	412(10)	412(20)	412(20)
443(10)	443(18)	442(10)	443(20)	443(20)
488(10)	486(20)	490(10)	490(20)	490(20)
531(10)				520(20)
547(10)	551(20)	560(10)	555(20)	565(20)
			660(20)	
667(10)	671(20)	665(10)		670(20)
678(10)		674(7.5)		
		681(7.5)	680(10)	
		709(10)		
748(10)	745 (15)	754(7.5)	745(20)	750(40)
		779(15)		
869(15)	862 (39)	865(20)	865(40)	865(40)
		940(20)		
		1020(40)		

注: 表格中数字格式, 表示中心波长 (带宽), 单位是 nm。

高光谱辐射计光谱范围应在 380~900 nm, 覆盖水色传感器的所有波段。光谱分辨率 (FWHM) 处于 3~10 nm。波长准确性不大于光谱分辨率的 10%(10% FWHM), 波长稳定性不大于光谱分辨率的 5%, 信噪比要优于 100:1, 线性度优于 0.1%。杂散光抑制不大于各波段最大信号的 10^{-5} 。水上和水下的最大视场角 (全角) 分别是 5° 和 20° 。

目前国际上代表性海洋辐射计主要有 RAMSES 系列 (TriOS 公司)^[18], OCR 系列 (Seabird 公司)^[19] 和 C-OPS 辐射测量系统 (BioSpheric 公司)^[20]。其中包括了多光谱和高光谱辐射计两大类, 其中 RAMSES 系列提供高光谱辐射计, OCR 系列包括 4 通道和 7 通道的多光谱辐射计 (OCR504, OCR507) 和高光谱辐射

计 (HyperOCR), C-OPS 的微型辐射计可提供 13 或 19 波段的多光谱辐射计。表 2 显示了目前多光谱辐射计典型商业化产品的主要技术指标, 其中 C-OPS 具有更高的灵敏度, 它具有更广泛的应用, 水色产品的印证是其应用之一。表 3 显示了目前高光谱辐射计典型商业化产品的主要技术指标。HyperOCR 高光谱辐射计的光谱范围、采样间隔和精度等指标与 RAMSES 类似。

表 2 多光谱辐射计代表性商业化产品性能比较

Table 2 Performance comparison of typical commercial products of multi-spectral radiometer

传感器	OCR		C-OPS	
测量参数	辐亮度	辐照度	辐亮度	辐照度
光接收器类型	10° FOV	余弦, 86 mm ²	水中 7° 半角	余弦
探测器	13 mm ²	17 mm ²	Si(13 mm ²), InGaAs(7 mm ²)	
	Si 光电二极管	Si 光电二极管	GaAsP7(mm ²)	
波段范围	400~700 nm 可定制		250~1650 nm 可定制 (1100~1650 nm 用 InGaAs)	
通道数	4 或 7		13 或 19	
带宽	10 或 20 nm		10 nm FWHM	
带外响应	—	10	—	—
典型辐射	300×10 ⁻⁶	8.7×10 ⁻³	1.8×10 ⁻⁶	2.3×10 ⁻⁵
	μW/cm ² /nm/sr	μW/cm ² /nm	μW/cm ² /nm/sr	μW/cm ² /nm
等效噪声			@490 nm	@490 nm
余弦响应	—	0° ~60°, 3%; 60° ~85°, 10%	—	—

表 3 高光谱辐射计代表性商业化产品性能比较

Table 3 Performance comparison of typical commercial products of hyperspectral radiometer

型号	RAMSES	HyperOCR
可用光谱范围	320~950 nm	350~800 nm
探测器	256 像素 Si 光电二极管阵列	256 像素 Si 光电二极管阵列
光谱采样间隔	3.3 nm/ 像素	3.3 nm/ 像素
波长精度	0.3 nm	0.3 nm
可用通道数	190	136
等效辐射噪声 NEI	4×10 ⁻⁵ μW/cm ² /nm@500 nm 8 s	1×10 ⁻³ μW/cm ² /nm@500 nm 1 s
@ 辐照度		
等效辐射噪声 NEI	2.5×10 ⁻⁵ μW/cm ² /nm/sr@500 nm 8 s	5.3×10 ⁻⁵ μW/cm ² /nm/sr@500 nm 1 s
@ 辐亮度		
饱和度	8×10 ² μW/cm ² /nm @500 nm 4 ms	9 μW/cm ² /nm @500 nm 1 s
积分时间	4 ms~8 s	4 ms~2 s

3 固有光学性质参数的测量

固有光学性质包括吸收和散射性质。常用的描述散射性质的参数包括体积散射函数、散射系数及后向散射系数等, 其中, 最基本的是体积散射函数。以下首先简要介绍这些固有光学性质的定义, 接着介绍它们的测量方法等信息。

如图 4 所示^[15], 有一体积为 ΔV 、厚度为 Δr 的水体。一准直单色窄光束, 其光谱辐射能量为 $\Phi_i(\lambda)$, 入射到该水体上, 一部分入射光 $\Phi_a(\lambda)$ 被水体吸收, 一部分 $\Phi_s(\theta, \lambda)$ 被散射到光束外, 夹角为 θ , 剩下的 $\Phi_t(\lambda)$ 透过水体而不会发生方向上的改变。令 $\Phi_s(\lambda)$ 等于所有散射光的功率, 另外, 假设都是弹性散射 (光子在散射过程中没有波长的变化)。那么, 根据能量守恒,

$$\Phi_i(\lambda) = \Phi_a(\lambda) + \Phi_s(\lambda) + \Phi_t(\lambda), \quad (12)$$

光谱吸收率 $A(\lambda)$ 定义为水体吸收的能量与入射能量的比为

$$A(\lambda) = \frac{\Phi_a(\lambda)}{\Phi_i(\lambda)}. \quad (13)$$

同样的, 光谱散射率 $B(\lambda)$ 定义为散射光束的能量与入射能量的比为

$$B(\lambda) = \frac{\Phi_s(\lambda)}{\Phi_i(\lambda)}, \quad (14)$$

以及光谱透射率为

$$T(\lambda) = \frac{\Phi_t(\lambda)}{\Phi_i(\lambda)}, \quad (15)$$

其中, $A(\lambda) + B(\lambda) + T(\lambda) = 1$ 。

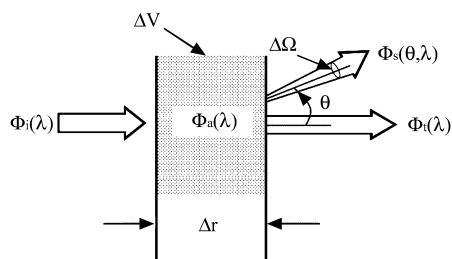


图 4 固有光学性质定义示意图^[15]

Fig.4 Schematic diagram of definition of inherent optical properties^[15]

光谱吸收系数为单位长度上的吸收率 (单位: m^{-1})

$$a(\lambda) \equiv \lim_{\Delta r \rightarrow 0} \frac{A(\lambda)}{\Delta r}, \quad (16)$$

光谱散射系数为单位长度上的散射率 (单位: m^{-1})

$$b(\lambda) \equiv \lim_{\Delta r \rightarrow 0} \frac{B(\lambda)}{\Delta r}, \quad (17)$$

光谱总衰减系数为

$$c(\lambda) \equiv a(\lambda) + b(\lambda). \quad (18)$$

用 $B(\theta, \lambda)$ 表示散射角度为 θ 、立体角 $\Delta\Omega$ 内的散射能量 (如图 4), 则单位距离、单位立体角内的散射率 (单位: $\text{m}^{-1}\text{sr}^{-1}$)

$$\beta(\theta, \lambda) \equiv \lim_{\Delta r \rightarrow 0} \lim_{\Delta\Omega \rightarrow 0} \frac{B(\theta, \lambda)}{\Delta r \Delta\Omega} = \lim_{\Delta r \rightarrow 0} \lim_{\Delta\Omega \rightarrow 0} \frac{\Phi_s(\theta, \lambda)}{\Phi_i \Delta r \Delta\Omega}, \quad (19)$$

$\beta(\theta, \lambda)$ 称为体积散射函数。将 $\beta(\theta, \lambda)$ 在全立体角内进行积分便得到光谱散射系数为

$$b(\lambda) = \int_X i \beta(\theta, \lambda) d\Omega = 2\pi \int_0^\pi \beta(\theta, \lambda) \sin \theta d\theta, \quad (20)$$

假定水体是各向同性的介质, 其散射是轴对称的, 这里的轴是光的入射方向, 所以体积散射函数不依赖方位角 ϕ , 因此简写为 $\beta(\theta, \lambda)$ 。有时为研究方便, 将光谱散射系数分为前向散射和后向散射。前向散射为散射角 $0 \leq \theta \leq \pi/2$ 内的积分, 后向散射为散射角 $\pi/2 \leq \theta \leq \pi$ 内的积分。对应的光谱前向散射系数和光谱后向散射系数分别为

$$b_f(\lambda) \equiv 2\pi \int_0^{\pi/2} \beta(\theta, \lambda) \sin \theta d\theta, \quad (21)$$

$$b_b(\lambda) \equiv 2\pi \int_{\pi/2}^\pi \beta(\theta, \lambda) \sin \theta d\theta. \quad (22)$$

通常将后向散射与体积散射系数之比定义为散射后向散射比率, 即

$$\tilde{b}(\lambda) \equiv \frac{b_b(\lambda)}{b(\lambda)}, \quad (23)$$

该式表明了后向散射占整个散射的百分比。

3.1 吸收的测量

水体光谱吸收的测量常用方法主要分为 3 类, 即基于反射管的方法^[21]、基于分光光度计的方法^[22-23]及基于积分腔的方法^[24]。下面依次介绍它们的原理及目前的发展概况。

3.1.1 基于反射管的测量原理

如图 4 所示的准直光传输的示意图, 光谱吸收系数为

$$a(\lambda) = \lim_{\Delta r \rightarrow 0} - \frac{\Phi_k(\lambda) - \Phi_i(\lambda)}{\Phi_i(\lambda) \Delta r}, \quad (24)$$

其中, $\Phi_k(\lambda) = \Phi_t(\lambda) + \Phi_s(\lambda)$, $\Phi_t(\lambda)$ 和 $\Phi_s(\lambda)$ 分别为透过和散射的辐射能量。将上式写成微分形式

$$\frac{d\Phi(\lambda)}{\Phi(\lambda)} = -a(\lambda) dr, \quad (25)$$

对上式在光学路径 r_t 上进行积分

$$a(\lambda) \int_0^{r_t} dr = - \int_0^{r_t} \frac{d\Phi(\lambda)}{\Phi(\lambda)}, \quad (26)$$

则

$$a(\lambda) = \frac{\ln \Phi_i(\lambda, 0) - \ln \Phi_k(\lambda, r_t)}{r_t} = - \frac{\ln \left(\frac{\Phi_k(\lambda, r_t)}{\Phi_i(\lambda, 0)} \right)}{r_t} = - \frac{\ln T_k(\lambda, r_t)}{r_t}. \quad (27)$$

由式 (27) 可知, 只要测量了透射和散射能量的总和, 就可以计算出吸收系数。

反射管式方法就是基于以上原理, 其基本方法是将样品放入具有高反射特性的圆柱管中, 平行光做光源, 通过圆柱管壁的反射, 使前向的散射光聚集到接收器前端的漫射体上, 接收器同时接收通过漫射体的

光和直接透射的光。反射管式吸收测量仪作为现场测量水体吸收光谱的基本仪器已有近 20 年的时间^[21], 最具代表性的两款商业化产品是由原美国 WETlabs 公司研发的 AC-9 和 AC-S^[19], 其中 AC-9 2014 年后不再生产。这两款仪器都设置有双光路系统, 分别测量水体吸收和衰减光谱, 其中 AC-9 测量 9 个通道的光谱, AC-S 测量高光谱吸收。AC-9 采用 9 个独立的干涉滤光片(带宽 10 nm) 测量 9 个通道的吸收, 标准通道设置为: 412、440、488、510、532、555、650、676、715 nm。AC-S 采用线性可变滤光片, 在 398~730 nm 范围内有约 84 个通道, 光谱分辨率约为 4 nm。AC-S 及 AC-9 的构造基本相似, 如图 5 所示。其中, 1) 光源, 2) 1 mm 孔径, 3) 透镜, 4) 红外滤光器, 5) 滤光轮, 6) 分光装置, 7) 参考光接收器, 8) 6 mm 石英光窗, 9) 25 cm 全吸收流管, 10) 单透镜, 11) 光电接收器

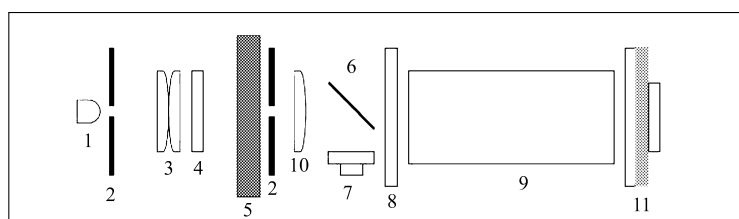


图 5 反射管式吸收测量仪 (AC-9 和 AC-S) 结构原理图^[19]

Fig.5 Structure of reflection tube absorption meter(AC-9, AC-S)^[19]

AC-S 及 AC-9 有多种工作模式, 用于现场测量吸收光谱适用于多种工作平台: 船、锚系浮标、潜标、水下移动平台 (AUV、ROV 及水下滑翔机等), 使用方便。

基于反射管式的测量方法存在一定的缺陷。根据发射管吸收测量原理, 接收器需要全部接收透射光和散射光, 但实际上接收器很难接收到所有散射光。首先占散射约 2~3% 的后向散射光无法到达接收器, 另外, 实际上理想的全反射管很难实现。研究发现^[25], 大约 75~85% 的散射光到达接受面, 接受散射损失量与颗粒物散射强度有关。因此, 为了获取可靠的吸收数据, 在后续数据处理中进行散射校正是必须的, 为此已进行了众多研究, 发展了多种校正方法^[21,26-27]。

3.1.2 基于分光光度计的测量方法

根据以上分析, 通过测量透射光和散射光, 可以计算出吸收光谱。如果在忽略散射的条件下, 只要测量透射光, 就可测量吸收。也就是, 通过测量透过率, 就可计算吸收光谱。透过率光谱的测量可以方便地使用分光光度计实现。目前利用分光光度计的方法已成为测量水中有效光学组分的吸收光谱的基本方法^[28]。该方法首先将采集的水样进行预处理, 将颗粒物和可溶有机物进行分离, 然后分别测量它们的吸收光谱。对于可溶有机物吸收的测量采用 0.2 μm 聚碳酸酯膜过滤水样, 利用分光光度计测量滤液的光学密度, 实现可溶有机物吸收的测量。对于颗粒物的测量采用 0.7 μm 的玻璃纤维膜, 利用分光光度计测量滤膜上留存颗粒物的光学密度, 实现颗粒物吸收的测量。以下分别介绍它们的具体测量方法。

1) 可溶有机物吸收测量

用 0.2 μm 滤膜过滤水样后的滤液为可溶有机物水样, 其中的颗粒物已经去除, 光的散射主要为分子的散射, 考虑到样品池的长度有限 (通常 10 cm), 在此情况下, 散射可以忽略。根据吸收测量原理, 只要测量样品透过率 T , 即可计算吸收系数

$$a(\lambda) = -\frac{\ln[T(\lambda)]}{L}, \quad (28)$$

其中 L 为测量样品的光学路径长度。

分光光度计测量得到的为光密度 OD_g 与透过率的关系为

$$OD_g(\lambda) = -\log_{10}[T(\lambda)]. \quad (29)$$

吸收系数可通过公式 (30) 得出

$$a_g(\lambda) = \frac{2.303}{L} OD_g(\lambda) . \quad (30)$$

2) 颗粒物吸收测量

对于颗粒物吸收的测量, 将颗粒物富集到玻璃纤维膜上, 通过测量膜上颗粒物的光密度计算吸收光谱。但是, 玻璃纤维膜及颗粒物都具有强的散射, 这样接收器会有显著的散射损失^[29], 如果不进行校正, 导致测量的吸收系数存在很大的误差。目前, 基于分光光度计颗粒物吸收方法有如下几种模式^[28]: 透射模式、透射 - 反射模式以及内装模式, 如图 6 所示。除透射模式外, 其它两种模式均采用积分球。采用积分球方式, 可以接收到更多路径散射, 以减小接收器的散射损失, 提高测量精度。

根据吸收的测量原理, 已知分光光度计测量的膜上颗粒物的光学密度 OD_p , 吸收系数为

$$a_p(\lambda) = \frac{2.303}{L} OD_p(\lambda) , \quad (31)$$

其中 L 为等效几何路径, A 为滤膜的有效面积, V 为过滤水样体积, 则

$$L = \frac{V}{A} . \quad (32)$$

路径散射损失, 实际效应是增加了光学路径的长度, 增大了吸收信号, 因此必须对分光光度计测量的光密度进行校正, 以获取准确的吸收系数。根据最新的研究结果^[30], 不同测量模式下, 路径放大校正后的光密度 OD_p 与分光光度计测量的光密度 OD_f 之间的透射模式、透射 - 反射模式、内装模式的统计关系分别为

$$OD_p = 0.679(OD_f)^{1.28} , \quad (33)$$

$$OD_p = 0.719(OD_f)^{1.23} , \quad (34)$$

$$OD_p = 0.323(OD_f)^{1.09} . \quad (35)$$

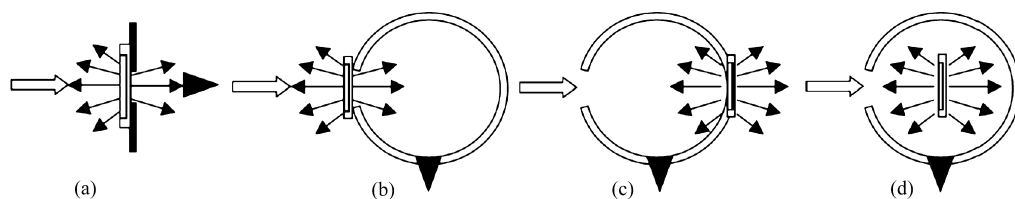


图 6 分光光度计测量颗粒物光密度的设置^[28]。(a) 透射模式, (b) 和 (c). 透射 - 反射模式, (d) 内装模式

Fig.6 Different modes of measuring particle optical density by spectrophotometer^[28]. (a) Transmission mode, (b-c) transmission-reflection mode, (d) built-in mode

在颗粒物吸收测量中, 可进一步将颗粒物分为浮游植物和非浮游植物颗粒物。采用的方法是膜上颗粒物的光密度测量后, 采用甲醇或 $NaClO$ 氧化方法去除膜上的色素, 最后测量膜上剩余非色素颗粒物的光学密度。用上述同样的方法可计算出非色素颗粒物的吸收 $a_d(\lambda)$ 。浮游植物的吸收光谱通过二者相减可以得到。

基于分光光度计的方法优点是可以分别测出各种光学活性组分的吸收光谱, 其缺点是测量过程复杂, 消耗时长, 需要大量人力, 且无法实现在线测量。

3.1.3 点光源积分腔测量方式

另一种常用的水体吸收测量方式是点光源积分腔式^[24,31]。结构原理如图 7 所示, 位于腔体中心的光源照射腔体中的水样, 积分腔的壁由高反射材料(朗伯体)构成。积分腔中光子的多次反射使其总的路径长度远大于腔的尺寸, 这大大增加了有效路径长度, 从而提高了测量的灵敏度。更为重要的是这种方法对散射不敏感, 它不受或很少受到颗粒悬浮体散射的影响。

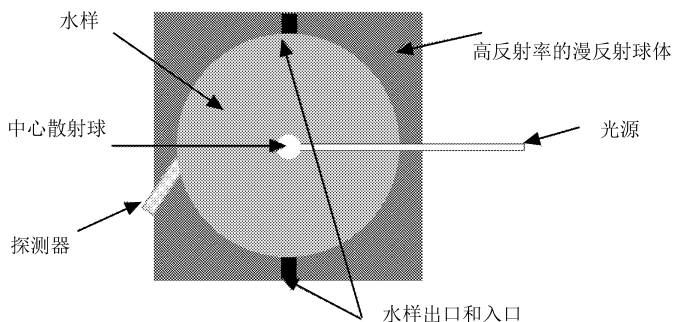


图 7 点源积分腔式吸收仪的结构原理

Fig.7 Structure diagram of Point-source integrating-cavity absorption meter



图 8 德国 TRIOS 公司点源积分腔吸收仪 OSCAR 结构

Fig.8 Picture of OSCAR cavity

根据 Leathers 等人^[31]和 Kirk^[32]的研究结果, 在腔内充满样品 A 和样品 B 时, 点源积分腔吸收仪 (PSICAM) 测得的光透射率 T_{AB} 是内腔壁上的漫射辐照度的比值, 由下式表示

$$T_{AB} = \frac{P_0(a_A, r_0)P_s(a_A, r)[1 - \rho P_s(a_B, r)]}{P_0(a_B, r_0)P_s(a_B, r)[1 - \rho P_s(a_A, r)]}, \quad (36)$$

其中, P_0 为中心光源的光子直接到达腔壁的概率, P_s 是被反射的光子再次到达腔壁的概率, ρ 是腔壁的反射率, $r_0 = r - r_s$, r 是腔体的内半径, r_s 是中心光源的半径。 P_0 及 P_s 与样品吸收系数 a 的关系为^[32]

$$P_0(a, r_0) = \exp(-ar_0) \quad (37)$$

$$P_s(a, r) = \frac{1}{2a^2r^2}[1 - \exp(-2ar)(2ar + 1)] \quad (38)$$

如果测量了透过率 T_{AB} , 且已知腔内壁的反射率以及其中一种样品(参考样品)的吸收系数(通常为纯水, 光谱吸收已知), 根据式(36)、(37)和(38), 可以求出另一种待测样品的吸收系数。

如果腔内壁的反射率未知, 可以通过下式得出

$$\rho = \frac{T_{AB} \exp(-a_B r_0) P_s(a_B, r) - \exp(-a_A r_0) P_s(a_B, r)}{T_{AB} \exp(-a_B r_0) P_s(a_A, r) P_s(a_B, r) - \exp(-a_A r_0) P_s(a_B, r) P_s(a_B, r)} \quad (39)$$

通常利用不同浓度的苯氨黑溶液作为测量反射率的样品, 苯氨黑在不同的波长都有很强的吸收, 不同浓度苯氨黑溶液的光谱吸收系数由分光光度计测量。

目前基于点源积分腔的商品化仪器主要有德国 Trios 公司生产的 OSCAR(结构如图 8 所示)^[18]。其光谱范围 360~750 nm, 通道数 256 个, 光谱分辨率 3.3 nm, 内腔直径 50 mm 或 80 mm 可选。

3.2 光谱衰减系数的测量

依据图 4 所示的准直光传输的示意图, 光谱衰减系数为

$$c(\lambda) = \lim_{\Delta r \rightarrow 0} \frac{\Phi_i(\lambda) - \Phi_t(\lambda)}{\Phi_i(\lambda)\Delta r}, \quad (40)$$

其中 Φ_i 为入射光束的辐射能量, Φ_t 为透过的辐射能量, Δr 为路径长度。将上式写为微分形式

$$\frac{d\Phi(\lambda)}{\Phi(\lambda)} = -c(\lambda)dr . \quad (41)$$

对上式在光学路径 r_t 上进行积分, 得到

$$c(\lambda) \int_0^{r_t} dr = - \int_0^{r_t} \frac{d\Phi(\lambda)}{\Phi(\lambda)} , \quad (42)$$

光束衰减系数为

$$c(\lambda) = \frac{\ln \Phi_i(\lambda, 0) - \ln \Phi_t(\lambda, r_t)}{r_t} = \frac{-\ln \frac{\Phi_t(\lambda, r_t)}{\Phi_i(\lambda, 0)}}{r_t} = \frac{-\ln T(\lambda, r_t)}{r_t} , \quad (43)$$

根据上式, 通过测量透过率 T 可获得光谱衰减系数。

WET Labs 公司的 AC-9 和 AC-S 产品双光路系统中测量光谱衰减系数一路就是基于上述原理设计的, 其结构原理如图 9 所示。图中, 1) 光源, 2) 1 mm 孔径, 3) 透镜, 4) 红外滤波器, 5) 滤光轮, 6) 分光装置, 7) 参考光接收器, 8) 6 mm 石英光窗, 9) 25 cm 流管, 10) 透镜, 11) 光电接收器。

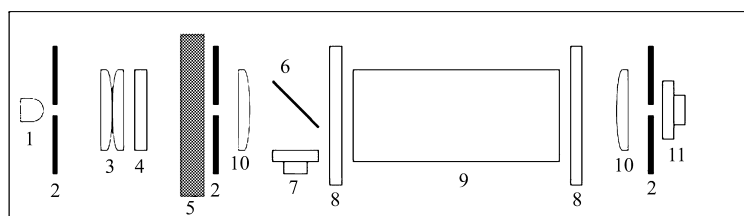


图 9 AC-9 和 AC-S 衰减仪结构原理^[19]

Fig.9 Structure of c-tube in AC-9 and AC-S^[19]

此外, 另外一种商业化的高光谱衰减仪是德国 TriOS 公司的 VIPER^[18], 测量的光谱范围为 360~750 nm, 光谱分辨率 2.2 nm, 光谱通道 256 个, 光程有 50 mm、100 mm、150 mm 和 200 mm 四种可选。

3.3 散射性质的测量

体积散射函数是描述散射性质的基本参数, 其它相关参数包括体积散射系数、后向散射系数等。

根据前面的分析, 衰减系数是吸收系数和散射系数之和, 因此如果测量了衰减系数和吸收系数, 则体积散射系数可由二者相减得到。前面介绍的 AC-9 及 AC-S 测量系统可以同时给出衰减系数、吸收系数及散射系数。以下主要介绍体积散射函数和后向散射系数的测量。

3.3.1 体积散射函数的测量

依据图 4 所示的准直光传输的示意图, 体积散射函数为

$$\beta(\theta, \lambda) \equiv \lim_{\Delta r \rightarrow 0} \lim_{\Delta \Phi \rightarrow 0} \frac{\Phi_s(\theta, \lambda)}{\Phi_i \Delta r \Delta \Phi} , \quad (44)$$

其中, Φ_i 为入射光束的能量, Φ_s 为 θ 散射方向 $\Delta\Omega$ 立体角内接收的能量, Δr 为路径长度。因此只要测量各个散射方向上的辐射能量, 就可以得到水体的体积散射函数。但是, 实际上它的测量比吸收更困难。首先, 体积散射函数的动态范围特别大, 如角度从 0.1° 变到 90° 的过程中, 散射强度的变化大约有 5~6 个数量级, 固定角度散射强度在不同水域变化也有 2 个数量级。其次, 前向散射 ($\theta < 1^\circ$) 和后向散射 ($\theta > 179^\circ$) 的测量尤其困难。然而这些角度范围的测量又具有特别的意义。由于几乎一半的散射强度集中在几度的范围内, 小角度的准确测量对于通过积分获得至关重要, 另外, 小角度散射对于研究颗粒物的散射性质以及水下光学成像也非常重要。后向大于 179° 的散射与海洋激光雷达信号密切相关, 对海洋激光雷达信息提取至关重要。

全角度体积散射函数测量特别困难, 因此到目前为止, 体积散射函数的测量主要针对某一角度范围内。表 4 列出了一些代表性测量系统的信息。

表 4 一些代表性体积散射函数测量系统信息

Table 4 Information of some representative volume scattering function measurement systems

名称	角度指标	开发时间	应用	参考文献
ALSCAT	$< 1^\circ$	1960's	能见度和水下成像	Petzold, 1972 ^[6]
GASM	$10\sim 170^\circ$	1960's	光学海洋学	Petzold, 1972 ^[6]
LISST	$0.036\sim 13.8^\circ$	1990's	反演粒径分布、	LISST-200X ^[33]
	$0.1\sim 160^\circ$		光学海洋学及 水色遥感	LISST-VSF ^[33]
HydroScat6	后向散射	1990's	水色遥感	Maffione and Dana, 1997 ^[34]
BetaPi	近 180° 后向散射	1990's	LIDAR 遥感	Maffione and Honey, 1992 ^[35]
MVSM	$0.5\sim 177.6^\circ$	2000's	光学海洋学及水色遥感	Lee and Lewis, 2003 ^[36]
BB9	117° 后向散射	2000's	水色遥感	Boss and Pegau, 2001 ^[37]
HydroBeta	$10^\circ \sim 170^\circ$, 12 个角度	2000's	光学海洋学	Dana and Maffione, 2000 ^[38]
ECO-VSF3	100° 、 125° 、 150°	2000's	水色遥感	Moore, et al, 2000 ^[39]

以下介绍几种代表性散射测量仪器的工作原理。

10° 到 170° 范围内的体积散射函数的测量相对容易, 可直接在不同散射方向上放置不同接收器。图 10 显示了 HydroBeta 的测量原理示意图^[38], 在 12 个角度处设置了 12 个接收器, 用于测量 12 个角度的散射函数。

LISST(LISST-200X) 及 ALSCAT 仪器都用于小角度散射的测量, 它们基于相同的测量原理, 如图 11 所示。准直光束通过水体, 散射光通过一凸透镜, 接收器位于焦平面上。根据几何光学原理, 具有相同散射角 θ 的光, 都会聚焦于接收面上半径为 R 的同一个圆环上。因此, 通过测量接收面不同圆环上光能量分布, 根据几何关系就可以计算出小角度散射。

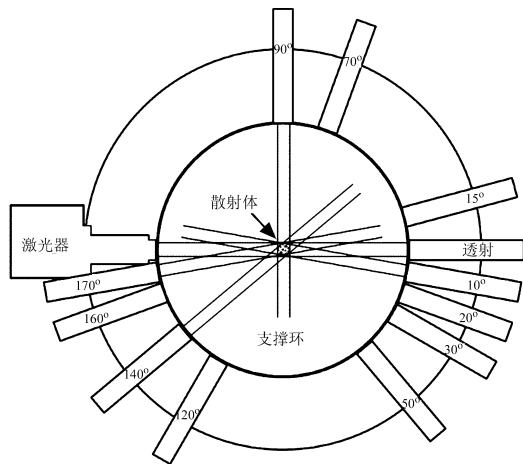


图 10 HydroBeta 的测量原理示意图^[38]

Fig.10 Structure diagram of HydroBeta^[38]

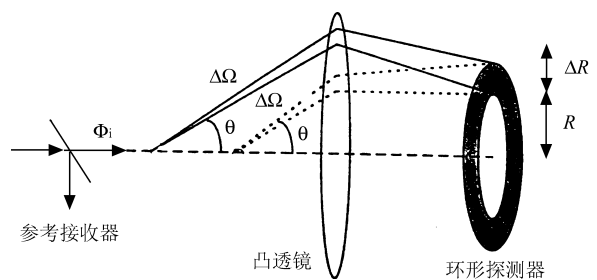


图 11 小角度散射函数的测量原理^[6]

Fig.11 Structure diagram of measuring small-angle VSF^[6]

在目前所有测量体积散射函数的仪器中,多光谱体散射仪(Multi-spectral volume scattering meter, MVSM)^[36]的角度测量范围最大,最小值为 0.5° ,最大值约为 177.6° 。为了扩大体积散射函数角度的测量范围, MVSM 接收部分采用了可旋转潜望镜的特殊设计方式,如图 12 所示。棱镜绕着光电探测系统的轴线旋转,其延伸穿过散射体的中心。这样设计的优点是在测量过程中光源和光电探测器单元是固定的。由于潜望镜的特殊结构及其精确可调整的旋转角度,使 MVSM 可测量更大角度范围内的散射,且具有很高的角度分辨率(0.38°)。

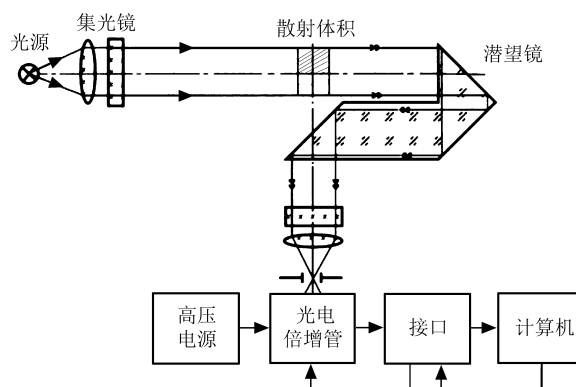


图 12 MVSM 体积散射函数测量仪的测量系统结构原理^[36]

Fig.12 Structure diagram of MVSM measurement system^[36]

3.3.2 后向散射系数的测量

理论上,后向散射系数可以通过测量体积散射函数而得到,也就是通过在 $90\sim 180^\circ$ 角度范围内的积分。但是实际上,由于大于 178° 的散射测量困难,无法通过积分获取。通过理论及实验发现^[34,37,40-41],后向某特定角度的体积散射函数与后向散射系数存在强的相关性。利用这个关系,只需测量后向一个特定角度的体积散射就可获取后向散射系数。这个特定角度的最优选择为 120° 附近^[37,40-43]。

目前两款商品化水体后向散射仪均是依据以上原理开发的,即美国 WET Labs 的 BB-9^[19]和 HOBI Labs 公司 Hydroscat-6^[44]。BB-9 采用 117° 散射角的体积散射函数获取后向系数,而 Hydroscat-6 采用 140° 散射角的体积散射函数获取后向系数(结构原理如图 13 所示)。BB9 可测量 9 个通道的后向散射系数, Hydroscat-6 测量 6 个通道的后向散射系数。

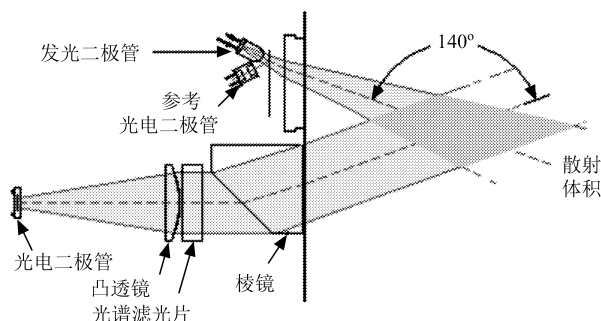


图 13 Hydroscat-6 吸收系统结构原理^[34]

Fig.13 Structure diagram of Hydroscat-6 measurement system^[34]

另一种高光谱后向散射计 Hyper-bb(美国 Sequoia 科学公司) 预计于 2019 年底开始发售,采用 135° 散射角,光谱范围 $430\sim 700\text{ nm}$,光谱分辨率从蓝光 9 nm 到红光 17 nm 。

4 展 望

过去的 20 年是海洋水体光学性质测量技术发展的黄金时期。在快速发展的光电测量及光谱技术的直接推动和巨大实际应用需求的牵引下, 海洋水体光学性质测量技术取得了巨大进展, 其主要表现为: 1) 商品化的测量仪器大量涌现, 覆盖了光学性质的基本参数, 且测量性能不断提高; 2) 各种参数的测量规范更加完善, 通过大量的实验研究, 在美国 NASA 及国际 IOCCG 组织的支持下, 出版发行了针对水色遥感领域的光学性质参数测量规范, 为获取高质量的数据提供了保障。

根据目前的实际需求及其未来的发展, 海洋水体光学测量技术在如下方面还需要进一步的发展。

1) 新的水体光学性质参数测量技术。目前对光学性质的测量主要针对强度及光谱性质, 缺乏对水体偏振特性测量的方便可靠仪器, 对水体偏振特性的了解远远不够。另外, 目前对辐射测量和固有光学性质的测量仪器仅有少量设有紫外波段。在未来的水色卫星计划中, 将设有紫外波段和偏振的测量, 因此, 无论对于光辐射量的测量还是对于固有光学性质的测量, 都需要考虑紫外波段和偏振特性。

2) 更高精度的测量技术。目前光学性质参数的测量普遍精度不够, 如某些参数的测量不确定性甚至超过 20%, 而海洋中温度和盐度的测量精度可以达到千分之几的量级, 可见如果光学性质测量参数的精度能达到盐度和温度的水平还有很长的路要走, 需要很多工作需要做。这些工作主要包括: 提出新的测量方法、采用灵敏度高的传感器以及发展先进的数据处理方法等。

3) 功耗小及体积紧凑的测量技术。研究长时间过程的海洋现象需要长时间序列的水下观测数据, 这需要水下的光学性质测量系统具有可靠的长期连续工作能力。另外, 水下较小移动工作平台(如水下滑翔机、漂流浮标等)应用越来越广泛, 这要求搭载在上面的光学测量系统不仅功耗小, 而且体积要紧凑, 重量要轻。但是目前绝大多数光学性质的测量仪器还无法满足这些要求。

参考文献:

- [1] Pettersson H. Scattering and extinction of light in seawater [J]. *Goteborgs K. Vetenskapsakad. Vitterh. Samh. Handl. (5), Ser. B, 4(4), Medd. Göteborg Högskolas Oceanogr. Inst.* 1934, **9**: 1-16.
- [2] Pettersson H. Transparency of Sea-Water [J]. *Nature*, 1936, **137**(3454): 68-68.
- [3] Pettersson, H. Measurements of the angular distribution of submarine light [J]. *Perm. Int. Cons. Explor. Mer Rapp. P.-V Reun.*, 1938, **108**(2): 7-12.
- [4] Jerlov N. The evolution of the instrumental technique in underwater optics [J]. *Progress in Oceanography*, 1963, **3**: 149-154.
- [5] Jerlov N. *Optical Oceanography* [M]. Amsterdam: Elsevier Oceanography Series, 5, Elsevier, 1968.
- [6] Petzold T J. Volume scattering functions for selected ocean waters [R]. SIO Ref. 72-78, Scripps Inst. Oceanogr., La Jolla, 1972: 179.
- [7] Kullenberg G. *Observed and computed scattering functions* [M]. Chap. 2. In: *Optical Aspects of Oceanography*. Jerlov and Nielsen, eds., New York: Academic Press, 1974: 25-49.
- [8] Bartz R J, Zaneveld R V, Pak H, et al. A transmissometer for profiling and moored observations in water [J]. *Ocean Optics V, Proceedings of SPIE*, 1978, **160**: 102-108.
- [9] Smith R C, Tyler J E. *Transmission of solar radiation into natural waters* [M], Photochemistry and Photobiology Reviews, Kendrick Smith, ed., New York: Plenum Press, 1976.
- [10] Moore C, Barnard A H, Fietzek P, et al. Optical tools for ocean monitoring and research [J]. *Ocean Science*, 2008, **5**(4): 661-684.

- [11] Dickey T D. New technologies and their roles in advancing recent biogeochemical studies [J]. *Oceanography*, 2001, **14**(4): 108-120.
- [12] Dickey T D. Studies of coastal ocean dynamics and processes using emerging optical technologies [J]. *Oceanography*, 2004, **17**(2): 9-13.
- [13] Dickey T D, Lewis M R, Chang G, *et al.* Optical oceanography: Recent advances and future directions using global remote sensing and in situ observations [J]. *Reviews of Geophysics*, 2006, **44**(1).
- [14] Kirk J T O. *Light and Photosynthesis in Aquatic Ecosystems* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, second ed., 1994: 509.
- [15] Mobley C D. *Light and Water: Radiative Transfer in Natural Waters* [M]. San Diego: Academic Press, 1994.
- [16] Mueller J, Morel A, Frouin R, *et al.* Ocean optics protocols for satellite ocean color sensor validation [R], Revision 4, Volume III: *Radiometric Measurements and Data Analysis Protocols*, Greenbelt: NASA Goddard Space Flight Center, 2003.
- [17] Zibordi G, Voss K J, Johnson B C, *et al.* IOCCG ocean optics and biogeochemistry protocols for satellite ocean colour sensor validation, Volume 3.0: Protocols for satellite ocean colour data validation: *in situ* optical radiometry [R]. *IOCCG Protocol Series* (2019). Dartmouth: IOCCG, 2019.
- [18] TriOS. Your partner for optical sensors [OL]. <https://www.trios.de/en/>.
- [19] Sea-Bird Scientific. Introducing new ebook-Sensors for AUVs and ROVs [OL]. <https://www.seabird.com/>.
- [20] Biospherical Instruments Inc. The XRR-Adaptable instruments for optically diverse environments [OL]. <http://www.biospherical.com/>.
- [21] Zaneveld J R V, Kitchen J C, Bricaud A, *et al.* Analysis of in situ spectral absorption meter data [J]. *Ocean Optics XI, G.D. Gilbert, Ed., SPIE*, 1992, **1750**: 187-200.
- [22] Kishino M, Takahashi M, Okami N, *et al.* Estimation of the spectral absorption coefficients of phytoplankton in the sea [J]. *Bulletin of Marine Science*, 1985, **37**(2): 634-642.
- [23] Kiefer D, SooHoo J. Spectral absorption by marine particles of coastal waters of Baja California [J]. *Limnology and Oceanography*, 1982, **29**(12):764.
- [24] Röttgers R, Schönfeld W, Kipp P, *et al.* Practical test of a point-source integrating cavity absorption meter: the performance of different collector assemblies [J]. *Applied Optics*, 2005, **44**(26): 5549-5560.
- [25] Jonasz M, Fournier G. *Light Scattering by Particles in Water: Theoretical and Experimental Foundations* [M]. Academic Press, 2007.
- [26] Röttgers R, McKee D, Woźniak S B. Evaluation of scatter corrections for ac-9 absorption measurements in coastal waters [J]. *Methods in Oceanography*, 2013, **7**: 21-39.
- [27] Mckee D, Piskozub J, Rottgers R, *et al.* Evaluation and improvement of an iterative scattering correction scheme for *in situ* absorption and attenuation measurements [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2013, **30**(7): 1527-1541.
- [28] Neeley A R, Mannino A. IOCCG ocean optics and biogeochemistry protocols for satellite ocean colour sensor validation, Volume 1.0: Inherent optical property measurements and protocols: absorption coefficient [R]. *IOCCG Protocol Series* (2018). Dartmouth: IOCCG, 2018.
- [29] Roesler C S. Theoretical and experimental approaches to improve the accuracy of particulate absorption coefficients derived from the quantitative filter technique [J]. *Limnology and Oceanography*, 1998, **43**(7): 1649-1660.

- [30] Stramski D, Reynolds R A, Kaczmarek S, *et al.* Correction of pathlength amplification in the filter-pad technique for measurements of particulate absorption coefficient in the visible spectral region [J]. *Applied Optics*, 2015, **54**(22): 6763-6782.
- [31] Leathers R A, Downes T V, Davis C O, *et al.* Analysis of a point-source integrating-cavity absorption meter [J]. *Applied Optics*, 2000, **39**(33): 6118-6127.
- [32] Kirk J T. Point-source integrating-cavity absorption meter: theoretical principles and numerical modeling [J]. *Applied Optics*, 1997, **36**(24): 6123-6128.
- [33] Sequoia Scientific, Inc. Optical VSF Sensors Volume Scattering Function, Depolarization and Backscattering instruments [OL]. <http://www.sequoiasci.com/product/optical-vsfsensors/>.
- [34] Maffione R A, Dana D R. Instruments and methods for measuring the backward-scattering coefficient of ocean waters [J]. *Applied Optics*, 1997, **36**(24): 6057-6067.
- [35] Maffione R A, Honey R C. Instrument for measuring the volume scattering function in the backward direction [J]. *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 1992, **1750**: 15-26.
- [36] Lee M E, Lewis M R. A New Method for the Measurement of the Optical Volume Scattering Function in the Upper Ocean [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2003, **20**(4): 563-571.
- [37] Boss E, Pegau W S. Relationship of Light Scattering at an Angle in the Backward Direction to the Backscattering Coefficient [J]. *Applied Optics*, 2001, **40**(30): 5503-5507.
- [38] Dana D R, Maffione R A. HydroBeta: A new instrument for measuring the volume scattering function from 10 to 170 degrees in situ [J]. *OceanOptics XV, extended abstracts*, 2000.
- [39] Moore C, Twardowski M S, and Zaneveld J R V. The EcoVSFA sensor for determination of the volume scattering function [J]. *Paper Presented at Ocean Optics XV Conference, Off. of Nav. Res., Monaco*, 2000.
- [40] Oishi T. Significant relationship between the backward scattering coefficient of sea water and the scatterance at 120° [J]. *Applied Optics*, 1990, **29**(31): 4658-4665.
- [41] Sullivan J M, Twardowski M S. Angular shape of the oceanic particulate volume scattering function in the backward direction [J]. *Applied Optics*, 2009, **48**(35): 6811-6819.
- [42] Zhang X, Boss E, Gray D J. Significance of scattering by oceanic particles at angles around 120 degree [J]. *Optics Express*, 2014, **22**(25): 31329.
- [43] Zhang X, Fournier G R, Gray D J. Interpretation of scattering by oceanic particles around 120 degrees and its implication in ocean color studies [J]. *Optics Express*, 2017, **25**(4): A191.
- [44] Hobi Instrument Services. Welcome [OL]. <https://www.hobiservices.com/>.