

水中颗粒物大角度范围体散射函数测量方法

郭乙陆^{1,2}, 陶邦一^{2*}, 黄海清², 吴超钺¹, 宋宏¹, 冷建兴¹

(1. 浙江大学海洋学院, 浙江舟山 316021;

2. 自然资源部第二海洋研究所 卫星海洋环境动力学国家重点实验室, 浙江杭州 310012)

摘要: 针对现有体散射测量系统中激光器与探测器相互遮挡导致探测角度减小的问题, 设计了一款新型的水中颗粒物的体散射函数测量系统。首先, 通过双潜望式光路结构, 将激光发生平面与散射探测平面分离, 减小了激光器对探测角度的遮挡; 同时, 通过潜望式出射棱镜将透射光导出水体, 避免了容器的杯壁散射, 提高背散射测量的准确性。根据实际工艺, 改进出射棱镜, 设计系统样机, 实现了 3°~178°大角度范围体散射函数的测量。结合系统结构与水下光传输原理, 根据数据矫正算法, 矫正由于测量光程及水体衰减造成的偏差。对比矫正后结果与米散射仿真结果, 证明方法的可靠性。

关键词: 大角度范围散射测量; 水中颗粒; 体散射函数; 米散射

中图分类号: O430 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA202049.0203011

Wide angle volume scattering function measurement methods for particles in water

Guo Yilu^{1,2}, Tao Bangyi^{2*}, Huang Haiqing², Wu Chaofan¹, Song Hong¹, Leng Jianxing¹

(1. Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan 316021, China; 2. State Key Laboratory of Satellite Ocean Environment Dynamics, Second Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Hangzhou 310012, China)

Abstract: A system for measuring the volume scattering function of water with particles was built, helping the laser and the detector to avoid the shading of each other that causes the reduce of detection angle. A set of double-periscopic optical system was used to separate the detection plane of scattering plane from laser exiting plane, thus the shelter of the laser source was minimized. What's more, as the transmission light was exported from the system, the scattering light of water container was avoided so that the precision of backscatter measurement was promoted. The prism for exporting underwater light was designed according to the manufacturing techniques and by which the scattering measurement equipment was designed to measure the scattering light ranges from 3° to 178°. Next, according to the structure of the system and the principle of optical transmission in water, data rectifying methods was designed to rectify the deviation of measurement optical distances and light absorption. The rectified results were finally compared with simulated results of Mie scattering, the main source of deviation was analyzed and the improvement scheme of the system was proposed.

Key words: wide angle range scattering measurement; particles in water; volume scattering function; Mie scattering

收稿日期: 2019-10-14; 修订日期: 2019-11-15

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC0213103, 2016YFC1400901); 民用航天技术预先研究项目(D040401-06);

国家自然科学基金(41876033, 61605038)

作者简介: 郭乙陆(1994-), 男, 博士生, 主要从事水体偏振相函数测量方面的研究。Email: yiluguo@zju.edu.cn

导师及通讯作者简介: 陶邦一(1983-), 男, 副研究员, 博士, 主要从事水色遥感、偏振测量方面的研究。Email: taobangyi@sio.org.cn

0 引言

海洋光学遥感由于其覆盖范围大、持续时间长的特点,在海洋监测领域中有不可替代的作用^[1-3]。海洋主被动遥感研究的指导性原则之一是利用水体的散射特性,求解“微分-积分”形式的水体辐射传输方程,实现从固有量到表观量的光学闭合^[4-5],其对遥感数据精确反演和数据理解有重要的意义。然而,由于水体辐射传输方程数值求解的核心是求解积分项过程中对体散射函数的参数化处理,而不同水体光学特性有极大的差异^[6]。缺乏可靠的实测体散射函数是光学闭合一直未能完全实现的重要原因。

目前,针对体散射函数测量的仪器和方法,国内外已经进行了一些研究。例如,SEQUOIA 公司生产了一套商用体散射测量系统(LISST-VSF),实现了 150° 以内的散射测量^[7]。国内方面,中国科学院南海研究所曹文熙团队建立一套 8 个固定角度的水下体散射函数测量仪^[8];华中科技大学杨克诚、夏珉团队利用成像方法开展了水中微小颗粒的三维体散射高效测量^[9-10];清华大学马辉、廖然团队同样利用成像方式开展了颗粒的二维体散射高效测量^[11],同时实现了 30~120° 范围的偏振体散射测量^[12]。这些工作主要关注对单个颗粒的形态测量来实现类型识别,因而,针对非球形特性创新性地采用二维甚至三维测量,已实现前向与中间角度体散射函数的准确研究,但尚未对后向大角度(例如 150°~180°)散射特性做密集采样。而在海洋主动遥感领域,后向大角度散射是接收信号最主要的来源,必须给予重点考虑。

然而,在后向大角度散射测量中,将会面临一些问题,主要包括:(1) 入射光经样品池壁镜面反射,导致后向散射测量值偏高;(2) 光源与传感器在同一平面,传感器受光源尺寸与摆放位置影响,由于遮挡产生阴影,限制了后向散射测量角度范围^[13-14]。此外,水体中气泡也会对系统性能造成影响^[15]。

针对这些问题,参考文献[16]提出了一款体函数测量系统,用于测量全角度散射光线。系统使用内置式光路结构,使系统样品池壁远离散射光路,避免壁散射光的影响;并通过潜望式系统将光源与探测系统分割到两个平面,减少遮挡产生的阴影面积,从而获得大角度的散射测量结果。

文中针对参考文献[16]提出的系统原理,在国内首次实现了平面分离式体散射测量系统的设计。首先根据参考文献[16]中的原理图,设计散射测量系统,并结合实际设计中遇到的问题,进一步改进参考文献[16]中提出的出射棱镜,降低加工难度。使用 2 μm 标准颗粒测试,融入去气泡水体中,测试系统性能。结果表明:该系统可以在 3°~178° 范围测量水体中颗粒物的散射特性。对比该系统与根据参考文献[16]设计系统的结果,发现经文中改进后,系统测量结果与仿真结果拟合程度更高。

1 体散射函数测量原理

1.1 体散射函数简介

散射光强在空间上的分布情况通过体散射函数(VSF)描述,如图 1 所示^[13],在 ΔA 面积上有 Φ_i 的辐射通量进入体积为 ΔV 的水体,在水体中经过距离 Δr 的传播,其中有 Φ_a 被水体吸收,同时有 $\Phi_s(\Delta\Omega)$ 被散射到立体角为 $\Delta\Omega$ 的空间上,在原传播方向上剩余辐射通量为 Φ_t 。忽略水中粒子微弱的偏振特性,则可以认为散射过程具有对称性,在某方向上的散射光可以用平面角度表示,即 $\Phi_s(\theta)$,其中 θ 是散射光与入射光夹角。基于上述定义,体散射函数(VSF)定义为:

$$\beta(\theta) = \lim_{\Delta r \rightarrow 0} \lim_{\Delta\Omega \rightarrow 0} \frac{\Phi_s(\theta)}{\Phi_i \Delta r \Delta\Omega} \quad (1)$$

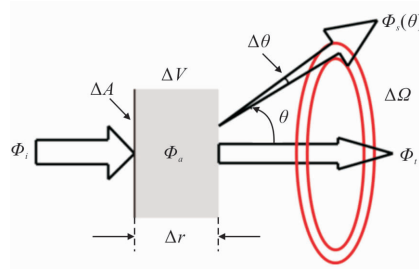


图 1 体散射函数

Fig.1 Volume scattering function

由公式(1)可知,在一个平面内以不同角度测量散射辐射通量,即可获取三维空间内的体散射函数。进一步,由于单波长光源的光强 $I(\theta)$ 与辐射通量 $\Phi_s(\theta)$ 呈线性相关,即:

$$\Phi_s(\theta) = kI_s(\theta), \Phi_i = kI_i \quad (2)$$

故可通过测量散射光强 $I_s(\theta)$, 获取水体的体散

射函数。

1.2 传统测量方法简介及分析

目前典型的体散射函数测量系统有直线运动式测量系统^[7]、转盘系统^[13]、反射式系统^[15]等。

典型的直线运动式系统有 LISST 系统。激光从侧壁射入立方体样品池，探测器在样品池上方沿着激光入射方向水平移动，接收中心始终对准样品池中心。在不同的位置，其探测的散射角度不同，故在平移过程中实现了体散射函数的测量。但使用该方法测量 0° 与 180° 附近的散射信号时，需要将探测器移动到极远处，在有限空间内难以实现。

反射式系统中，所有角度的反射光线通过环形反射镜反射，然后通过面阵探测器测量。该系统可测量大角度范围的散射光线，但该系统加工精度要求极高，设计较为困难。

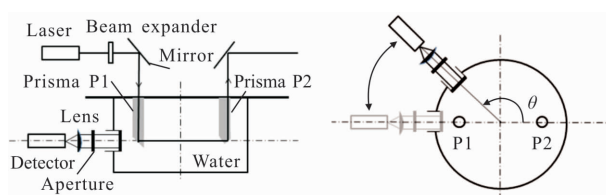
转盘结构中，样品盛于柱状样品池中，置于转盘中心位置。使用激光器对准样品池中心照射，产生各个不同方向的散射光线。探测器沿转盘的转轴转动，测量不同角度的散射光。该系统在测量非后向散射光时，有较好的效果，但在测量后向散射光时，将受到样品池壁反射的干扰。

1.3 体散射函数测量原理

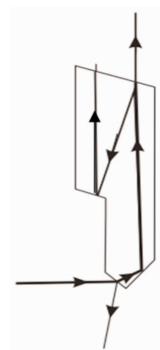
根据上文讨论，容器壁的反射是造成后向散射测量偏差的主要因素。文中参考文献[16]，设计了一套水体体函数测量系统。其原理如图 2(a)、(b)所示。由激光器发射的准直激光束光经过准直后，通过反光镜与棱镜 P1 入射到样品池中。光在水体中部分透射，部分经过水体吸收与散射，透射光进入棱镜 P2 并通过潜望镜结构离开样品池，特定方向上的散射光由安装于样品池侧壁的探测器系统接收。样品池可以带动探测器，在水平方向上做 180° 旋转，以测量各个角度的散射光 $I_s(\theta)$ 。

该系统的核心为出射棱镜 P2 的设计，其将水体的透射光导出测量系统，避免了透射光和小角度前向散射光线在样品系统的进一步反射，从而实现了后向散射的测量。典型的 P2 棱镜设计如图 2(c)所示，大部分光线经过 P2 棱镜的光学面入射到棱镜系统，小部分光线沿斜下方照射到样品池底部，由黑色底质吸收。透射光线经过 P2 棱镜的反射面后，大部分通过 P2 棱镜上表面透射，小部分通过棱镜中位的吸收面吸收，剩余部分继续通过上表面出射，从而导出

系统。使用 P2 棱镜后，系统将进一步避免反射光线的干扰。



(a) 主视图 (b) 俯视图
(a) Front view (b) Top view



(c) 出射棱镜 P2 特性
(c) Characteristics of the prism P2

图 2 体散射函数测量原理图

Fig.2 Principle of volume scattering function measurement

1.4 数据处理方法

根据图 2 所得各向散射光，在各个角度所探测的散射光程不同，且光在水中的衰减距离不同，如图 3 所示。故需要对数据做散射光程归一化和衰减补偿。

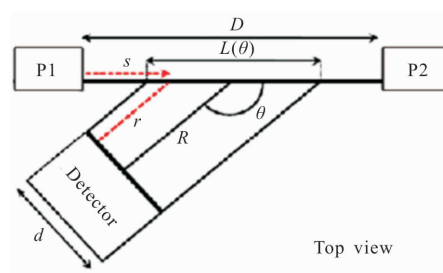


图 3 散射物理量校正示意图

Fig.3 Principle of scatter rectifying

1.4.1 散射光程归一化

散射光程一般由散射体积量化。散射体积的定义为入射光束与接收器视场的重合部分体积，其与散射光程线性相关。如图 3 所示， d 为接收器平行光视场直径； $L(\theta)$ 为不同角度入射光束与接收器视场

重合部分的长度，即为接收散射光程； D 为棱镜间距，即为散射总程。当探测器探测中间角度时(例如， $-d/D < \sin\theta < d/D$)，探测器接收散射光程为散射总光程的一部分，且随角度发生变化；当探测两端角度时，接收光程则覆盖了散射总光程。故接收光程可表示为：

$$\begin{cases} L(\theta) = \frac{d}{\sin\theta}, L(\theta) < D \\ L(\theta) = D, \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

则探测器测得单位散射光程产生的散射强度为 $I_n(\theta)$ ，可以表示为：

$$I_n(\theta) = \frac{I_s(\theta)}{L(\theta)} \quad (4)$$

1.4.2 衰减光程矫正

如图 3 所示，不同散射角度的光在水中传输的距离不同，导致其衰减程度不同。根据参考文献[16]，记衰减系数为 c ，入射光在水中传输的距离为 s ，散射光在水中的传输距离为 r ，则有关系：

$$r = R + \left(\frac{D}{2} - s \right) \cos\theta \quad (5)$$

根据光在水中衰减的规律，接收器探测到的散射光强 $I_n(\theta)$ 可以表示为：

$$I_n(\theta) = \int_{s=\frac{D+L}{2}}^{\frac{D+L}{2}} \underbrace{e^{-c(s+r)} ds}_{T(\theta, c)} \cdot I_{inc}(\theta) \quad (6)$$

式中： $I_{inc}(\theta)$ 为体散射函数。

进一步的， $T(\theta, c)$ 可以表示为：

$$T(\theta, c) = \frac{2e^{-c(R+\frac{D}{2})}}{c(1-\cos\theta)} \sinh\left(\frac{cL(1-\cos\theta)}{2}\right) \quad (7)$$

则体散射函数可以表示为：

$$I_{inc}(\theta) = \frac{1}{T(\theta, c)} * I_n(\theta) \quad (8)$$

2 实验系统与方法

2.1 系统设计

根据系统原理，设计如图 4 所示的体散射函数测量系统。使用激光器产生功率为 200 mW、波长为 532 nm 的激光，通过准系统直后，经由入射光路系统入射到样品池中，并由出射光路系统导出。样品池使用自加工系统，其高度可调，由步进电机转台带动旋转。探测器系统使用 38 mm 透镜，配合 1 mm 小孔，将散射光汇聚后入射至激光功率计，并由激光功率计探测光强。

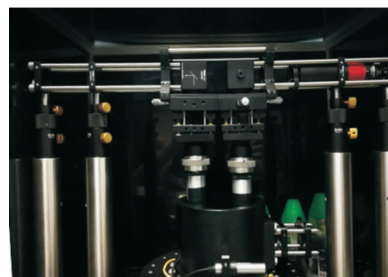
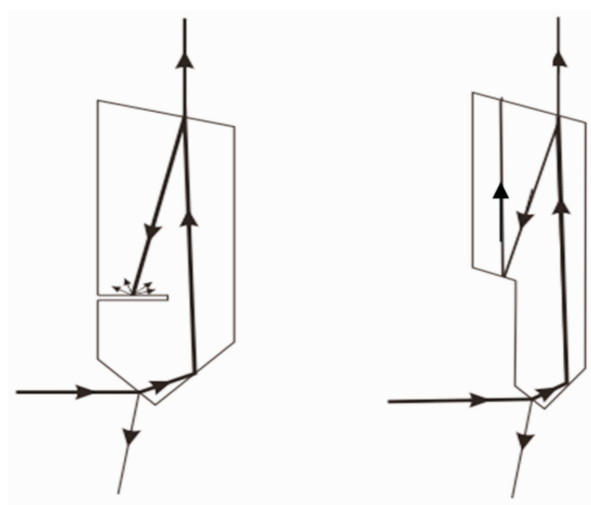


图 4 体散射函数测量系统

Fig.4 Measurement system of volumn scattering function

棱镜 P2 设计方面，文中设计了两种不同的棱镜结构，如图 5 所示。图 5(a) 参照参考文献[16]设计，但在实际应用中，由于加工工艺的原因，狭缝处无法抛光，有较强的漫反射，对背向散射测量结果造成干扰。图 5(b) 采用文中所述的新型出射棱镜设计，其任意表面均可抛光为平整表面并镀以吸光材料，有效提升背散射测量结果。



(a) 现有公开棱镜设计

(b) 文中设计棱镜

(a) Design of existing prism

(b) New designed prism

图 5 出射棱镜 P2 设计

Fig.5 Design of prism P2

2.2 实验方法

样品制备：使用除气泡系统对超纯水去除气泡；在 11 超纯水中滴入 1~2 滴标准颗粒 (2 μm 聚苯乙烯)，搅拌均匀，并静置 12 h，即可获得实验所需样品。

实验流程：调节样品池高度，使探测器系统与水中光路共面；旋转样品池角度，使探测器系统与水中光路共轴；以 1° 为间隔旋转探测器系统，依次测量各个角度的散射光强。最后，取出 10 mL 样品液，使用

分光光度计测量样品液的衰减，最终通过数据矫正算法获取散射强度。

使用以上流程依次测量纯水背景散射与样品液的体散射函数。

数据处理：将测得样品液体散射与纯水背景体散射函数相减，获取去背景体散射函数；然后依次根据公式(4)与公式(8)计算实际体散射函数。

3 实验结果与分析

使用该系统测量体散射函数，样品与纯水直接测量结果，即减背景后的结果如图 6(a)所示。结果表明：该系统可以实现 $3^{\circ}\sim 178^{\circ}$ 体散射信号的测量。

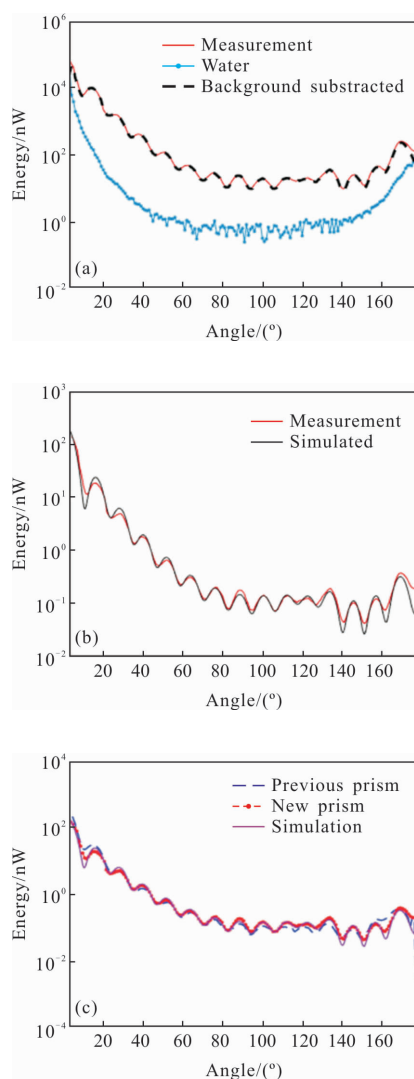


图 6 颗粒物体与纯水体散射测量结果及去纯水背景结果

Fig.6 Volume scattering measurement result of particles and pure water, and the background-subtracted results of pure water

经分光光度计测量，颗粒物的吸收系数为 $0.019/\text{m}$ 。使用该系数对结果进行数据矫正，并与米散射仿真结果作对比，结果如图 6(b)所示。该曲线与米散射仿真结果趋势吻合，后向强度无明显升高，证明结果的准确性。

使用与参考文献[16]相似的出射棱镜与文中设计棱镜的结果对比如图 6(c)所示。可以看出，由于文中所设计的棱镜的光学面加工更加方便、光学表面精度更高，测量结果明显优于原有棱镜。

4 结论

文中设计了一套水中颗粒物体散射函数测量系统。系统采用双潜望式棱镜系统，将光源与探测平面分离，避免了激光器与探测器的相互遮挡，实现了 $3^{\circ}\sim 178^{\circ}$ 角度范围内体散射函数的测量。同时，该方案使用一套出射光棱镜系统将透射水体的光线导出系统，避免了容器壁散射对后向散射测量结果的影响，提升了检测效果。使用标准颗粒物与去气泡超纯水配置样品溶液，测量并对数据做处理。测量结果与仿真结果对比，表明该测量系统的准确性。

文中的主要创新点为水体体散射测量系统设计。与以往的体散射测量系统相比，该系统不存在探测光路与激光光路之间遮挡问题，故无需将激光器及探测器系统远离样品系统以减少遮挡角度。与类似原理的系统相比，该系统根据实际加工需求对关键器件(即出射棱镜)进行了新的设计，与原方案相比提升了精度。

参考文献：

[1] Fan Bin, Chen Xu, Li Biqin, et al. Technical innovation of optical remote sensing payloads onboard GF-5 satellite [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46 (1): 0102002. (in Chinese)
 范斌, 陈旭, 李碧岑, 等. “高分五号”卫星光学遥感载荷的技术创新[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(1): 0102002.
 [2] Wan Zhi, Ren Jianwei, Li Xiansheng, et al. Waveband selection of optical remote sensor for detecting marine target [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16(10): 1864-1868. (in Chinese)
 万志, 任建伟, 李宪圣, 等. 探测海洋目标的光学遥感器工作波段选择[J]. 光学精密工程, 2008, 16(10): 1864-1868.

- [3] Cao Diansheng, Shi Zhenhua, Lin Guanyu. Development of airborne ocean modified Dyson hyperspectral imager [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(6): 1403-1409. (in Chinese)
曹佃生, 石振华, 林冠宇. 机载海洋改进型 Dyson 高光谱成像仪的研制[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(6): 1403-1409.
- [4] Mobley C D. *Light and Water* [M]. San Diego: Academic Press, 1994.
- [5] Chang G, Barnard A, Zaneveld J R V. Optical closure in a complex coastal environment: particle effects [J]. *Applied Optics*, 2007, 46(31): 7679-7692.
- [6] Chen Peng, Mao Zihua, Tao Bangyi, et al. Development of laser fluorometer system for CDOM measurements [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(9): 0903004. (in Chinese)
陈鹏, 毛志华, 陶邦一, 等. 激光诱导荧光装置用于海水可溶性有机物测量[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(9): 0903004.
- [7] LISST -200X Next Generation Submersible Particle Size Analyzer [EB/OL]. <http://www.sequoiasci.com/wp-content/uploads/2016/02/LISST-200X-brochure.pdf>.
- [8] Li Cai, Cao Wenxi, Jing Yu, et al. An instrument for in situ measuring the volume scattering function of water: design, calibration and primary experiments [J]. *Sensors*, 2012, 12(4): 4514 - 4533.
- [9] Dai J, Li W, Gong B, et al. Measurement of the light scattering of single micrometer-sized particles captured with a microfluidic trap [J]. *Optics Express*, 2015, 23(23): 30204-30215.
- [10] Wang Wanyan, Yang Kecheng, Luo Man, et al. Research of 3D volume scattering function measurement methods for suspended particles in water [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(3): 0329001. (in Chinese)
王万研, 杨克成, 罗曼, 等. 水体悬浮颗粒三维体散射函数测量方法研究[J]. *光学学报*, 2018, 38(3): 0329001.
- [11] Liao R, Roberts P L D, Jaffe J S. Sizing submicron particles from optical scattering data collected with oblique incidence illumination[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(33): 9440-9449.
- [12] Tian X, Liao R, Tao Y, et al. Obtaining shape information of marine microorganisms using polarized-light scattering [C]//Oceans-San Diego, IEEE, 2013: 1-5.
- [13] Liu H, Yang P, Song H, et al. Generalized weighted ratio method for accurate turbidity measurement over a wide range [J]. *Optics Express*, 2015, 23(25): 32703-32717.
- [14] Zugger M E, Messmer A, Kane T J, et al. Optical scattering properties of phytoplankton: Measurements and comparison of various species at scattering angles between 1° and 170° [J]. *Limnology and Oceanography*. 2008, 53(1): 381-386.
- [15] Tan H, Doerffer R, Oishi T, et al. A new approach to measure the volume scattering function [J]. *Optics Express*, 2013, 21(16): 18697-18711.
- [16] Chami M, Thirouard A, Harmel T. POLVSM (Polarized Volume Scattering Meter) instrument: an innovative device to measure the directional and polarized scattering properties of hydrosols[J]. *Optics Express*, 2014, 22(21): 26403-26428.