

## 近 180°水中悬浮颗粒物体积散射函数测量

陈 都<sup>1</sup>, 刘秉义<sup>1,2\*</sup>, 杨 倩<sup>3</sup>, 唐军武<sup>2</sup>, 吴松华<sup>1,2</sup>

- (1. 中国海洋大学 信息科学与工程学部 海洋技术学院, 山东 青岛 266100;
2. 青岛海洋科学与技术国家实验室 区域海洋动力学与数值模拟功能实验室, 山东 青岛 266237;
3. 齐鲁工业大学(山东省科学院) 山东省科学院海洋仪器仪表研究所, 山东 青岛 266071)

**摘 要:** 针对目前国内外现有的体积散射函数测量系统在后向小角度散射测量上的局限性, 提出了基于离轴反射式光路的近 180°水体体积散射函数测量方法并研发了实验室测量系统。系统采用离轴抛物面反射镜, 将后向小角度散射光和入射激光分离, 减小了系统后向小角度散射的测量盲区, 而且能够获取全方位角的后向小角度散射光信号。选取聚苯乙烯标准粒子用于测量系统定标检验, 结果表明, 定标后的测量系统能够完成在 173°~179.4°范围内水中悬浮颗粒物体积散射函数的测量, 角度分辨率为 0.01°。经对比分析, 体积散射函数测量值与米散射理论值具有很好的一致性, 验证了系统测量近 180°水体体积散射函数的准确性和可行性。

**关键词:** 后向小角度散射测量; 体积散射函数; 悬浮颗粒物; 米散射

**中图分类号:** O430 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20211029

## Measurement of volume scattering function of suspended particles in water approaching to 180°

Chen Du<sup>1</sup>, Liu Bingyi<sup>1,2\*</sup>, Yang Qian<sup>3</sup>, Tang Junwu<sup>2</sup>, Wu Songhua<sup>1,2</sup>

- (1. College of Marine Technology, Faculty of Information Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;
2. Laboratory for Regional Oceanography and Numerical Modeling, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China;
3. Institute of Oceanographic Instrumentation, Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences), Qingdao 266071, China)

**Abstract:** A method and laboratory system for measuring the volume scattering function (VSF) of water approaching to 180° were developed based on an off-axis reflective optical path, which overcame the limitations of the current VSF system in the measurement of backscattering at small angle. The system adopted an off-axis parabolic mirror to separate the backscattered light at small angle from the incident laser, which reduced the blind area for measuring the backscattering at small angle. In addition, it could obtain the small angle backscattering signal within full azimuth angle. The polystyrene standard particles were used for the calibration and validation of the system. The results show that the calibrated measurement system can provide the measurement of the volume scattering function of suspended particles in the range of 173°-179.4°, with an angular resolution of 0.01°. The experimental values of the particulate VSF agree well with the theoretical value calculated from Mie scattering. This proves the accuracy and feasibility of the system in measuring the volume scattering function of water

收稿日期:2021-05-06; 修订日期:2021-05-21

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC1400905, 2016YFC1400904)

作者简介:陈都,男,硕士生,主要从事海洋激光探测与水体散射测量方面的研究。

导师(通讯作者)简介:刘秉义,男,副教授,博士,主要从事海洋和大气激光探测方面的研究。

approaching to 180°.

**Key words:** measurement of backscattering at small angle; volume scattering function; suspended particles; Mie scattering

## 0 引言

海洋水体中的环境参数主要包括温、盐度剖面信息、深度分布以及海水组分信息等,近些年来,海洋水色遥感技术一直是监测海洋环境参数重要的海洋探测手段,能够提供水体光学参数、叶绿素浓度、浅海水深等海洋水体的特征参数,这些观测数据能作为在海洋环境监测、气候变化、灾害预警等领域的重要数据支持<sup>[1]</sup>。近些年来,海洋激光雷达作为新型的主动式海洋水色遥感技术,在剖面探测、夜间观测等方面具有显著优势,而且不受大气校正的影响。无论主动式或被动式海洋水色遥感的研究,都离不开海水固有光学性质的精确测量。

体积散射函数是表征海洋水体颗粒物散射特性的重要固有光学参数<sup>[2]</sup>,是海洋光学最基础的物理量之一,通过体积散射函数和吸收系数可以得到海水的所有固有光学性质。后向小角度体积散射函数的准确测量,对于海洋辐射传输模型的建立、海洋激光雷达原理印证和水中悬浮颗粒物特征信息的获取具有重要意义<sup>[2-5]</sup>。体积散射函数在后向小角度范围内存在一定的起伏特征,目前国内外现有的体积散射函数测量系统几乎都是针对广角和前向小角度范围内的散射测量系统<sup>[6-17]</sup>;而且受杂散光的干扰,能覆盖到后向小角度范围的散射测量系统的测量值普遍出现明显上升趋势<sup>[17]</sup>。

水体后向小角度散射测量的难点在于:(1)海洋水体中大多数悬浮颗粒物的近 180°体积散射函数的大小通常比 0°附近体积散射函数小六七个数量级,信号十分微弱;(2)在测量系统设计上,激光器和探测器都具有一定的体积,通常由于自身元件遮挡导致后向小角度散射光信号难以测量;(3)激光在入射到样品池侧壁上时,会产生高能量反射光,对后向小角度散射产生很大的噪声干扰。现有测量手段难以满足后向小角度范围内体积散射函数的测量需求。

文中针对以上问题,提出了一种基于离轴反射式光路的近 180°水体体积散射函数测量系统,散射角测量范围为 173°~179.4°,角度分辨率达到 0.01°。通过

测量聚苯乙烯标准粒子悬浮溶液,获取的体积散射函数实验测量值与米散射理论值具有较好的一致性。

## 1 散射测量基本原理

### 1.1 体积散射函数定义

体积散射函数就是描述散射光在空间上的角分布情况,定义示意图如图 1 所示<sup>[2]</sup>。 $\Phi_i(\lambda)$ 为入射到  $\Delta A$  面积上的光功率, $\Delta\Phi_a(\lambda)$ 是在  $\Delta r$  距离内吸收的光功率, $\Delta^2\Phi_s(\Psi, \lambda)$ 是散射到  $\Delta\Omega$  立体角范围内圆环上的光功率, $\Delta\Phi_t(\lambda)$ 是透射光功率。假设水中粒子各向同性且忽略粒子的偏振特性,体积散射函数定义为下面公式,见公式 (1):

$$\beta(\Psi, \lambda) = \lim_{\Delta r \rightarrow 0} \lim_{\Delta\Omega \rightarrow 0} \frac{\Delta^2\Phi_s(\Psi, \lambda)}{\Phi_i(\lambda)\Delta r\Delta\Omega} \quad (1)$$

其物理意义表示为单位距离、单位立体角的散射率。光谱辐射强度的定义为单位立体角上的散射功率,因此体积散射函数  $\beta(\Psi, \lambda)$  又可以写成公式 (2):

$$\beta(\Psi, \lambda) = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta I_s(\Psi, \lambda)}{E_i(\lambda)\Delta V} \quad (2)$$

式中: $\Delta I_s(\Psi, \lambda)$ 是  $\Delta\Omega$  立体角内的相对散射强度; $E_i(\lambda)$ 是入射辐照度; $\Delta V$ 是散射体体积。公式 (2) 物理意义表示为单位体积内、单位入射辐照度的散射强度。因此,可以通过测量不同散射角度的光强来获取水体的体积散射函数。

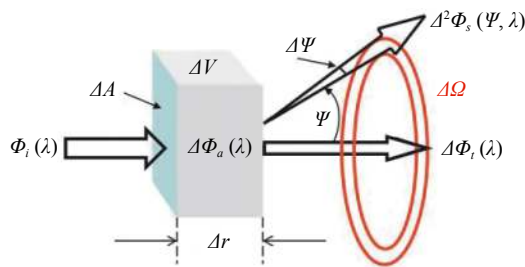


图 1 体积散射函数定义图<sup>[2]</sup>

Fig.1 Geometry for defining the volume scattering function<sup>[2]</sup>

### 1.2 球形粒子米散射理论

海水中光学活性成分包括纯海水、颗粒物和可溶有机物,粒径大小集中于 0.1 μm 到几十微米不等,散

射分布符合米散射基本特征。如图 2 所示为球形粒子米散射示意图<sup>[18]</sup>，一束波长为 $\lambda$ 、强度为 $I_0$ 的线偏振光入射到  $O$  点处一直径为  $d$  的均匀介质球形粒子上，光束振幅为  $E$ ，传播方向沿  $z$  轴方向，其电场、磁场的振动方向分别沿  $x$  轴和  $y$  轴方向； $OP$  为散射光，散射角  $\theta$  为  $z$  轴与散射光之间的夹角，方位角  $\varphi$  为散射光再  $xOy$  平面上的投影与  $x$  轴的夹角， $OPP'$  为散射平面。根据米散射理论， $P$  点处的散射光强度可以表示为：

$$I_s = \frac{\lambda^2 I_0}{4\pi^2 r^2} [ |S_1(\theta)|^2 \sin^2 \varphi + |S_2(\theta)|^2 \cos^2 \varphi ] \quad (3)$$

式中： $r$  为  $P$  点到散射体中心的距离； $|S_1(\theta)|^2$ 、 $|S_2(\theta)|^2$  分别表示为平行于和垂直于散射平面的强度分量； $S_1(\theta)$ 、 $S_2(\theta)$  为散射振幅函数，均可通过相应公式获得。

根据球形粒子米散射理论，可以在已知入射光偏振方向的条件下，得到球形粒子在空间内任意位置的散射强度，进而获取不同方位角散射平面上的散射相函数及体积散射函数，为利用聚苯乙烯标准粒子对测量系统进行定标检验提供参考依据。

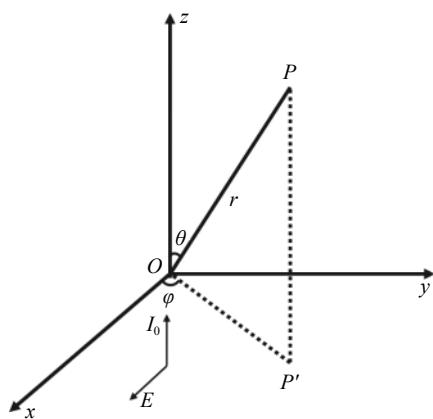


图 2 球形粒子米散射示意图

Fig.2 Schematic diagram of scattering by a sphere

## 2 实验测量系统

文中研制的近 180 度水体体积散射函数测量系统的基本原理图 (a) 和实物模型 (b) 如图 3 所示，主要包括激光发射器、离轴抛物面反射镜、散射样品、非球面透镜组、孔径光阑、CMOS 偏振敏感相机以及计算机，散射样品位于离轴抛物面反射镜的焦点处。如图 4 为离轴抛物面反射镜截面图，离轴抛物面反射镜

的反射面是母抛物面的截面，此截面不在母抛物面光轴中心。离轴抛物面反射镜的焦点与母抛物面的焦点重合，光轴 1 为母抛物面的光轴，光轴 2 是离轴抛物面反射镜的光轴，两光轴相互平行且互相偏离。图中母焦距即为母抛物面的焦距，反射有效焦距为离轴抛物面反射镜的中心点与母抛物面焦点之间的距离，反射有效焦距与离轴抛物面反射镜光轴之间的夹角  $\theta$  为离轴角，文中选取的离轴抛物面反射镜离轴角为  $90^\circ$ 。离轴抛物面反射镜背面开有锥形结构的通孔，该通孔穿过反射表面而形成小孔，通孔的中轴线与母抛物面的焦轴重合。入射激光经过离轴抛物面镜背面小孔，穿过反射面，入射到散射样品上，根据抛物面反射镜光学特性，散射样品的近  $180^\circ$  后向散射光经离轴抛物面反射镜反射变换为平行光束，再经过非球面透镜组与孔径光阑组成的双侧远心光路准直且调整

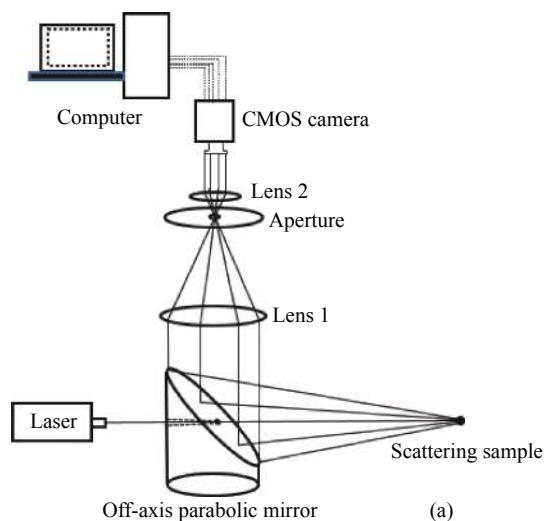


图 3 近 180° 水体体积散射函数测量系统原理图 (a) 和实物模型 (b)

Fig.3 Schematic diagram (a) and physical model (b) of the system for measuring volume scattering function of water approaching to  $180^\circ$

束宽后由 CMOS 偏振敏感相机接收散射光信号。根据后向散射角与 CMOS 像素点位置的对应关系,即可获得水体的各个方位角散射平面的近 180°体积散射函数。

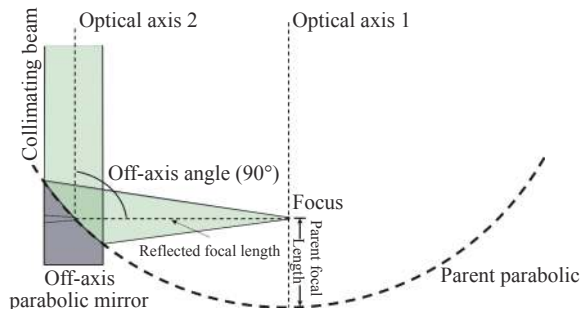


图 4 离轴抛物面反射镜截面图

Fig.4 Sectional view of off-axis parabolic mirror

综上所述,根据测量系统几何关系,CMOS 相机上成像的不同像素点位置与后向散射角具有一一对应的关系,在定标检验过程中需要根据像素点位置对应的散射角度完成不同角度与光强关系的反演。以抛物面顶点为原点建立笛卡尔三维坐标系,假设在 CMOS 相机上的任一像素点横纵坐标分别为  $X$ 、 $Y$ ,根据几何模型关系,该像素点坐标  $X$ 、 $Y$  与水体后向小角度散射角  $\psi$  的标准方程函数关系见公式 (4)。式中:  $L_1$  是透镜 1 的焦距;  $L_2$  是透镜 2 的焦距;  $L_{PFL}$  是离轴抛物面反射镜母焦距的长度;  $L_{RFL}$  是离轴抛物面镜反射有效焦距的长度,单位均为 mm;  $n_w$  是水体折射率。

$$\psi = \arcsin \left[ \sin \left( 180 - \arctan \frac{\sqrt{\left(\frac{L_1}{L_2} Y\right)^2 + \left(\frac{1}{4L_{PFL}} \left[ \left(-L_{RFL} - \frac{L_1}{L_2} X\right)^2 + \left(\frac{L_1}{L_2} Y\right)^2 \right] - L_{PFL}\right)^2}}{\left| -L_{RFL} - \frac{L_1}{L_2} X \right|} \right) / n_w \right] \quad (4)$$

### 3 测量系统定标与检验

#### 3.1 实验样品

在选取样品溶液时,需要考虑海洋水体中颗粒物粒径的真实分布范围,同时选取在系统的散射角度测量范围内颗粒物散射光强度变化趋势具有代表性的聚苯乙烯标准粒子作为测量样品。选取要求主要依据以下两点,一是选取在系统的散射角度测量范围内的散射光强度变化趋势平缓的标准粒子用于测量系

在文中测量系统中,颗粒物散射光能够覆盖的相机成像区域是以中心像素为圆心,直径为 6 mm 的像区,大约覆盖 230 万个像素点,在体积散射函数反演过程中,需要根据在成像区域内的所有像素点对应的散射角来计算不同角度的散射强度。通过光学仿真软件光线追迹来确定测量系统中的颗粒物散射角度和像素坐标的关系。图 5 是利用光学仿真软件光线追迹获取的颗粒物散射角度和像素坐标的对应关系,水平中线测量角度范围是 172.5°~179.4°,垂直中线测量角度范围是 173°~179.4°。由于离轴抛物面反射镜的非球面特点,系统的标准散射角度关于横轴对称,关于纵轴不对称,在 172.5°~173.5°范围内,并不能获取在全方位角范围内的散射强度信息。

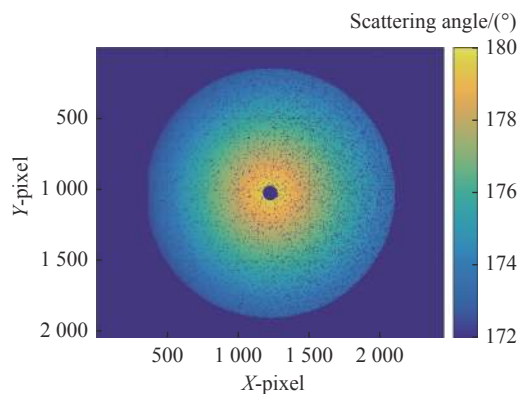


图 5 测量系统 CMOS 相机像素坐标与颗粒物散射角度的对应关系

Fig.5 Correspondence between CMOS camera pixel coordinates and particle scattering angle of measurement system

统的强度定标;二是选取在系统的散射角度测量范围内的散射光强度变化具有波动起伏趋势的标准粒子作为定标后系统的验证。图 6 展示了亚微米级 (a)、微米级 (b) 聚苯乙烯标准粒子在测量范围内的散射相函数的最小值归一化曲线,通过利用各自在角度测量范围内的理论散射相函数的最小值做完归一化之后,可以看出不同粒径标准粒子的散射相函数变化趋势的差异。如图 6(a) 所示,在散射角度测量范围内,亚微米级 (a) 聚苯乙烯标准粒子的散射相函数呈单调变

化趋势,随着粒径的增大,散射相函数最大值与最小值的差异逐渐增大;粒径小于 0.5  $\mu\text{m}$  的标准颗粒的散射相函数的幅值变化很小,1  $\mu\text{m}$  粒径标准颗粒的散射相函数的幅值变化最大,最大值与最小值相差约 5 倍。如图 6(b) 所示,微米级聚苯乙烯标准粒子在测量角度范围内的散射相函数具有典型的波动起伏特征,其波动的幅值和频率均随粒径增大。

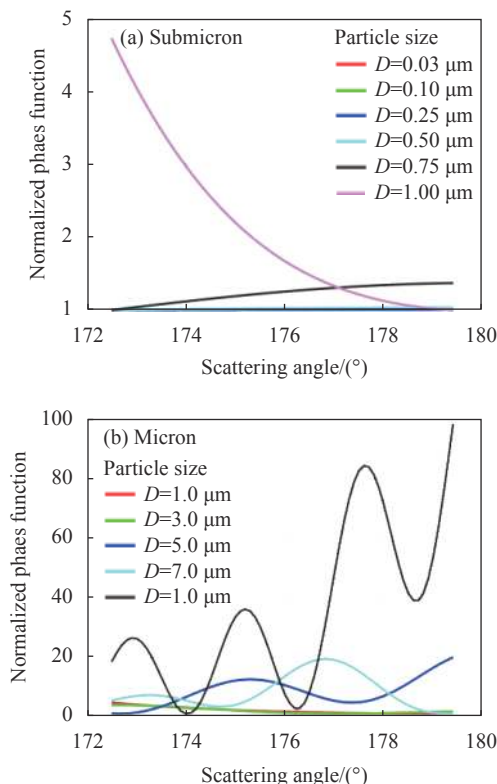


图 6 亚微米级 (a) 和微米级 (b) 聚苯乙烯标准粒子散射相函数最小值归一化曲线

Fig.6 Minimum normalized scattering phase function of Submicron (a) and Micron (b) polystyrene standard particles

综上所述,根据亚微米级和微米级聚苯乙烯标准粒子在角度测量范围内的散射相函数变化特征,文中选用 0.1  $\mu\text{m}$  粒径的聚苯乙烯标准粒子用于系统定标,选用 1  $\mu\text{m}$  和 10  $\mu\text{m}$  粒径的聚苯乙烯标准粒子用于定标后系统测量结果的验证。表 1 是文中选取的聚苯乙烯标准粒子的规格, $\mu_D$  为实际平均直径,PS 为固含量(固相含量 1% g/mL), $\sigma_D$  为粒径标准偏差,CV 为变异系数(coefficient of variation),定义为粒径标准偏差比上实际平均直径, $n$  为标准粒子折射率, $N_0$  为每 mL 样品中的微球个数。实际中,标准粒子悬浮溶液

中的粒径分布遵循对数正态分布,依据实际平均直径、粒径标准偏差、折射率以及每 mL 样品中的微球个数便可以根据球形粒子的米散射特征计算出理论的体积散射函数。

在目前国内外现有的体积散射函数测量系统中,无论是反演体积散射函数还是根据米散射理论计算标准颗粒的散射特性,都有一个基本的假设,就是激光在样品溶液中传输时只考虑单次散射,通常以散射样品的光学厚度  $\tau$  作为参考依据<sup>[8]</sup>。文中稀释溶液去离子水的溶液量为 25 mL,表 2 是三种标准粒子在抽取不同样品溶液量稀释后的情况下,根据米散射理论计算出的样品溶液理论散射系数,以不同海洋水体光学性质的数量级作为参考,0.1、1、10  $\mu\text{m}$  粒径聚苯乙烯标准粒子在分别抽取 1~5  $\mu\text{L}$  的溶液量时,理论散射系数数量级能与不同的海洋水体光学性质相匹配,且样品溶液的光学厚度  $\tau$  均小于 0.1,则可以认为样品溶液中不会产生多次散射。在标准粒子的样品溶液配制完成后,使标准颗粒微球能够在去离子水中分散均匀。

表 1 文中使用的聚苯乙烯标准粒子规格

Tab.1 Specification of polystyrene standard particles used in this paper

Material	$\mu_D/\mu\text{m}$	PS	$\sigma_D/\mu\text{m}$	CV<5%	$n$	$N_0/\text{mL}$
Polystyrene	0.0965	1%	0.0019	1.97%	1.598	$1.82 \times 10^{13}$
Polystyrene	0.977	1%	0.0254	2.6%	1.598	$1.82 \times 10^{10}$
Polystyrene	10.08	1%	0.24	2.38%	1.598	$1.82 \times 10^7$

表 2 不同浓度聚苯乙烯标准粒子悬浮溶液散射系数

Tab.2 Scattering coefficient of polystyrene standard particle suspension solution with different concentrations

Concentration	$D=0.1 \mu\text{m}$	$D=1 \mu\text{m}$	$D=10 \mu\text{m}$
Dilute 1 $\mu\text{L}$	0.0634/m	1.67/m	0.1366/m
Dilute 5 $\mu\text{L}$	0.3154/m	8.345/m	0.685/m

### 3.2 定标检验过程

根据米散射理论,当线偏振光入射到已知浓度和粒径分布的球形粒子上时,可以计算出在不同方位角散射平面上的体积散射函数。测量过程中选取 0.1  $\mu\text{m}$

标准粒子作为定标粒子, 根据在特定方位角散射平面上测量的颗粒物散射强度  $I_{cal}(\Psi, \Phi)$  和相应的颗粒物体积散射函数  $\beta_{cal}(\Psi, \Phi)$  的理论值, 获取定标系数  $R$ :

$$R = \frac{I_{cal}(\Psi, \Phi)}{\beta_{cal}(\Psi, \Phi)} \quad (5)$$

式中:  $I_{cal}(\Psi, \Phi)$  是定标粒子在方位角为  $\Phi$  的散射平面上的散射强度;  $\beta_{cal}(\Psi, \Phi)$  是定标粒子的理论体积散射函数, 定义为颗粒物散射相函数与其散射系数的乘积。

选取  $1 \mu\text{m}$  和  $10 \mu\text{m}$  标准粒子作为检验粒子, 测量其在特定方位角散射平面上的散射强度, 利用定标系数  $R$  获取其体积散射函数的数值:

$$\beta_{val}(\Psi, \Phi) = \frac{I_{val}(\Psi, \Phi)}{R} = \frac{I_{val}(\Psi, \Phi)}{I_{cal}(\Psi, \Phi)} \times \beta_{cal}(\Psi, \Phi) \quad (6)$$

式中:  $I_{val}(\Psi, \Phi)$  是检验粒子在方位角  $\Phi$  散射平面上的散射强度;  $\beta_{val}(\Psi, \Phi)$  是检验粒子在方位角  $\Phi$  散射平面上的体积散射函数测量值。

### 3.3 水平线偏光测量结果

当入射激光偏振方向为水平方向时, 离轴抛物面反射镜的长轴中线和短轴中线所在的散射平面的方位角分别为  $0^\circ$  和  $90^\circ$ , 其散射光强度分别对应于 CMOS 相机水平中线和垂直中线的灰度值。由于散射平面的不同, 在定标过程中, CMOS 相机不同方位角上散射强度的定标系数不同。在文中定标检验过程中, 选用相机垂直中线所在的  $90^\circ$  方位角散射平面作为参考散射平面。相机垂直中线对应离轴抛物面反射镜的短轴中线, 由于离轴抛物面反射镜的非轴对称特点, 限制了在该散射平面的散射角度测量范围在  $173^\circ \sim 179.4^\circ$ 。图 7(a) 和 (b) 的蓝线分别为  $1 \mu\text{m}$  和  $10 \mu\text{m}$  粒径标准粒子在水平线偏光入射时, 利用颗粒物散射强度测量值和定标系数  $R$  得到的  $90^\circ$  方位角散射平面上的体积散射函数测量值曲线, 角度分辨率为  $0.01^\circ$ ; 红线是根据米散射计算的两种标准粒子体积散射函数理论值曲线。

由图 7 可见, 水平线偏振光入射条件下, 在  $173^\circ \sim 177.7^\circ$  散射角范围内,  $1 \mu\text{m}$  粒径标准粒子的体积散射函数的测量值和理论值的数值和变化趋势基本吻合。在  $177.7^\circ$  之后, 由于  $1 \mu\text{m}$  粒径标准粒子的理论散射相函数大小比其他两种标准粒子小一到两个数量级, 因此在同样的实验条件下,  $1 \mu\text{m}$  标准粒子在系

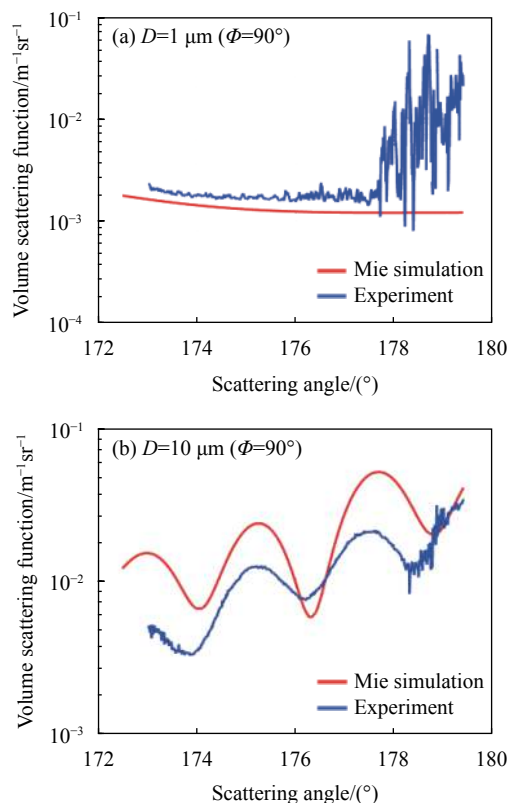


图 7  $1 \mu\text{m}$  (a) 和  $10 \mu\text{m}$  (b) 粒径标准粒子体积散射函数测量值与理论值 (方位角  $\Phi=90^\circ$ )

Fig.7 Measured value and theoretical value of volume scattering function of  $1 \mu\text{m}$  (a) and  $10 \mu\text{m}$  (b) size standard particle (azimuth angle  $\Phi=90^\circ$ )

统测量角度范围内的散射强度比其他两种标准粒子小约 1 个数量级。当散射角大于  $177.7^\circ$  时, 由于背景杂散光较强, 导致体积散射函数测量值信噪比较低。 $10 \mu\text{m}$  粒径标准粒子的体积散射函数测量值与理论值曲线在波动起伏和波动周期上具有较好的一致性, 且在趋近  $180^\circ$  附近的测量值具有较高的信噪比。两种标准粒子在体积散射函数的测量数值与理论数值上具有一些差异, 在  $90^\circ$  方位角散射平面上,  $1 \mu\text{m}$  和  $10 \mu\text{m}$  粒径标准粒子体积散射函数测量值与理论值在可信区间内的相对平均偏差为 0.34 和 0.42。造成该误差的主要原因一是两次溶液抽取过程中存在浓度误差; 二是悬浮溶液中存在粒子聚集的现象。

### 3.4 垂直线偏光测量结果

当入射激光偏振方向为垂直方向时, 离轴抛物面反射镜的长轴中线和短轴中线所在的散射平面的方位角分别为  $90^\circ$  和  $0^\circ$ , 其散射光强度分别对应于 CMOS

相机水平中线和垂直中线的灰度值。与水平线偏光入射时相同,选取相机垂直中线对应的 $0^\circ$ 方位角散射平面作为参考散射平面。图 8(a)和图 8(b)的蓝线分别为 $1\ \mu\text{m}$ 和 $10\ \mu\text{m}$ 粒径标准粒子在垂直线偏光入射时,利用颗粒物散射强度测量值和定标系数 $R$ 得到的 $0^\circ$ 方位角散射平面上的体积散射函数测量值曲线,角度分辨率为 $0.01^\circ$ ;红线是根据米散射计算的两种标准粒子体积散射函数理论值曲线。

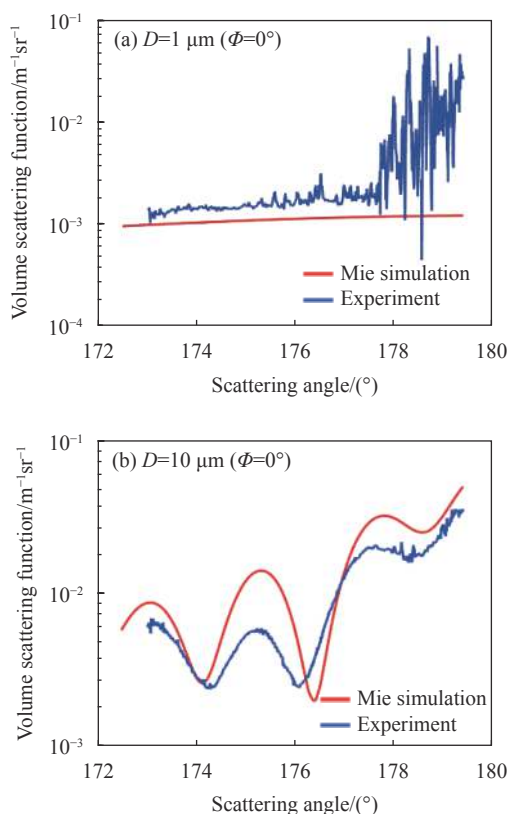


图 8  $1\ \mu\text{m}$  (a) 和  $10\ \mu\text{m}$  (b) 粒径标准粒子体积散射函数测量值与理论值 (方位角  $\phi=0^\circ$ )

Fig.8 Measured value and theoretical value of volume scattering function of  $1\ \mu\text{m}$  (a) and  $10\ \mu\text{m}$  (b) size standard particle (azimuth  $\phi=0^\circ$ )

由图 8 可见,垂直线偏振光入射条件下,在 $173^\circ\sim 177.7^\circ$ 散射角范围内, $1\ \mu\text{m}$ 粒径标准粒子的体积散射函数的测量值的数值和趋势都与理论值基本一致,在 $177.7^\circ$ 由于信噪比较低,测量值不具有参考意义; $10\ \mu\text{m}$ 粒径标准粒子的体积散射函数测量值与理论曲线的数值和变化趋势都具有很好的一致性,在趋近 $180^\circ$ 附近的测量值仍具有较高的信噪比和可信度。在 $0^\circ$ 方位角散射平面上, $1\ \mu\text{m}$ 和 $10\ \mu\text{m}$ 粒径标准粒子体积散

射函数测量值与理论值在可信区间内的相对平均偏差为 0.45 和 0.35。

## 4 结 论

文中提出了一种基于离轴光路的近 $180^\circ$ 水体体积散射函数测量系统。测量系统采用离轴抛物面反射镜和双侧远心光路相结合的方式,有效解决了光路遮挡和各种杂散光的干扰问题,实现了对水中悬浮颗粒物的近 $180^\circ$ 体积散射函数的测量,散射角测量范围在 $173^\circ\sim 179.4^\circ$ ,角度分辨率达到 $0.01^\circ$ 。

选取在测量角度范围内体积散射函数具有代表性变化趋势的三种粒径尺度的标准粒子完成测量系统定标和检验。通过改变入射激光的线偏方向,实现了 $1\ \mu\text{m}$ 和 $10\ \mu\text{m}$ 粒径标准粒子在 $90^\circ$ 和 $0^\circ$ 散射平面上体积散射函数的测量,测量结果与米散射理论值具有较好的一致性,验证了文中测量系统设计原理的可行性和测量结果的准确性。

## 参考文献:

- [1] Seelye Martin. An Introduction to Ocean Remote Sensing[M]. UK: Cambridge University Press, 2013.
- [2] Mobley C D. Light and Water: Radiative Transfer in Natural Waters[M]. USA: Academic Press, 1994.
- [3] Kong Xiaojuan, Liu Bingyi, Yang Qian, et al. Simulation of water optical property measurement with shipborne lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(2): 0205010. (in Chinese)
- [4] Berthon J F, Shybanov E, Lee E G, et al. Measurements and modeling of the volume scattering function in the coastal northern Adriatic Sea [J]. *Applied Optics*, 2007, 46(22): 5189-5203.
- [5] Chami M, Shybanov E B, Khomenko G A, et al. Spectral variation of the volume scattering function measured over the full range of scattering angles in a coastal environment [J]. *Applied Optics*, 2006, 45(15): 3605-3619.
- [6] Petzold T J. Volume scattering functions for selected ocean waters[R]. San Diego: Scripps Institute of Oceanography, 1972: 72-78.
- [7] Kullenberg G. Light-scattering observations in frontal zones [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1978, 83(C9): 4683-4690.
- [8] Babin M, Stramski D, Reynolds R A, et al. Determination of the volume scattering function of aqueous particle suspensions with

- a laboratory multi-angle light scattering instrument [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(17): 3853-3873.
- [9] Shao B, Jaffe J S, Chachisvilis M, et al. Angular resolved light scattering for discriminating among marine picoplankton: modeling and experimental measurements [J]. *Optics Express*, 2007, 14(25): 12473-12484.
- [10] 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.
- [11] Chami M, Thirouard A, Harmel T. POLVSM (Polarized Volume Scattering Meter) instrument: An innovative device to measure the directional and polarized scattering properties of hydro-sols [J]. *Optics Express*, 2014, 22(21): 26403-26428.
- [12] 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 & Oceanic Technology*, 2003, 20(4): 563-571.
- [13] 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.
- [14] Slade W H, Agrawal Y C, Mikkelsen O A. Comparison of measured and theoretical scattering and polarization properties of narrow size range irregular sediment particles[C]//OCEANS – San Diego. IEEE, 2013: 1-6.
- [15] 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.
- [16] Wang W, Yang K, Li W, et al. Measuring the three-dimensional volume scattering functions of microsphere suspension: Design and laboratory experiments [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019, 11(5): 1-17.
- [17] Guo Yilu, Tao Bangyi, Huang Haiqing, et al. Wide angle volume scattering function measurement methods for particles in water [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(2): 0203011. (in Chinese)
- [18] Bohren C F, Huffman D R. Absorption and Scattering of Light by Small Particles[M]. Weinheim: Wiley, 1983: 83-129.