

图像式海水小角度散射函数测量仪*

黄晓圣 吴 东 张亭禄 贺明霞 刘智深

(青岛海洋大学海洋遥感研究所, 国家教委海洋遥感开放研究实验室, 青岛 266003)

摘 要 根据海水辐射传递理论和光学信息处理方法所建立的海水水体点扩展函数(PSF)和海水小角度散射函数之间的关系, 研制了一台基于图像测量处理原理的新型现场海水小角度散射函数测量仪, 通过对点扩展函数(PSF)的测量及运用本文作者的计算方法获得了海水小角度散射函数。与以往的同类仪器相比, 这台仪器具有 0.01° 的角度分辨率、5% 的精度, 同时结构简单可靠, 并已经获得了东中国海的典型海区的海水小角度散射数据。

关键词 海水小角度散射函数, 海水辐射传递, 点扩展函数, 光学传递函数。

1 引 言

天然海水中悬浮着大量有机生物微粒, 在近岸水和近底层水中还有相当数量的无机矿物粒子, 其中多数粒子的尺度分布在零点几微米到几十微米之间。这些粒子的存在决定性地影响了水体对可见光的散射性质, 强烈的前向散射就是海洋水体最显著的光散射特征之一。在海水的传输问题中, 前向散射起着十分重要的作用, 它使得大多数散射光能量分布在光束传播方向附近, 特别是分布在光束传播方向附近一个很小的角度之内。通常情况下, 在 $0^\circ \sim 5^\circ$ 范围之内的小角度散射光通量超过总散射光通量的 50%。海水小角度散射函数就是描述在海水中光传播方向附近小角度内散射光通量分布的海洋光学参数。

在很多重要的应用中, 海水对光束的大角度散射往往可以忽略, 而小角度散射则起着极重要的作用。自 80 年代起得到迅速发展的水下激光通讯、海洋激光雷达探测、水下视觉系统等应用中, 海水小角度散射函数都是极为关键的海洋光学参数, 因为它与海水光衰减系数共同决定了水下光束的扩展与水下图像的模糊, 因此, 海水小角度散射函数的研究与测量得到了日益广泛的重视。

光在海水中的散射是一个极其复杂的物理过程。海水中各种有机的与无机的悬浮粒子对光的散射特别是对光的前向散射起着决定性作用。在不同的海区, 悬浮粒子在数量上和光学性质上都变化甚大, 现场采样后在实验室进行分析得到的光学数据往往与水下现场有所不同, 所以海水的光学性质应力求在现场进行水下测量。在实际应用中需要海水小角度散射函数的现场数据。已有一些现场测量海水小角度散射的仪器^[1, 2], 但它们有的只能测量固定角度的小角度散射, 有的角度测量范围和角度分辨率远不能满足实用需要。还有一些实验室装

* 国家自然科学基金资助项目“海洋光学参数激光探测新方法研究”(编号: 49486007)。

收稿日期: 1998-04-01; 收到修改稿日期: 1998-05-25

置虽可以达到较高的角度分辨率,如青岛海洋大学采用光学信息处理方法,使用准直激光束和空间滤波,在实验室中测到了下限为 0.01° 的小角度散射,角度分辨率可以达到 0.3° ,但这种方法需要极精密的光学对准,实现现场测量在技术上难度较高。在此基础上,本文作者研制了一台新型的海水小角度散射函数现场测量仪,成功地进行了现场测量,获得了不同海区各个深度的海水小角度散射函数现场数据。

2 基本原理

从光学信息处理的角度看,海水水体是一个线性空不变系统,可以根据海洋辐射传递的基本方程应用信息处理的理论和方法推导出海水点扩展函数 F_{PSF} 与海水体积散射函数 $\beta(\theta)$ 之间的关系,在文献[3]中已给出了它们之间的关系,主要推导过程如下:

由海洋辐射传递方程出发

$$\frac{dL}{dr} = -cL + \int_{4\pi} L\beta(\theta, \theta') d\tilde{\omega}' \quad (1)$$

式中, L 为辐射亮度, c 为海水衰减系数,对(1)式进行傅里叶-贝塞耳变换得

$$\frac{d\tilde{L}}{dr} = -c\tilde{L} + \tilde{\beta}\tilde{L} \quad (2)$$

其解为:

$$\tilde{L}(r, \psi) = \tilde{L}(0, \psi) \exp[-(c - \tilde{\beta})r]$$

这里“ $\tilde{\quad}$ ”指傅里叶-贝塞耳变换, ψ 表示空间频率。

若令 $L(0, \theta) = \delta(\theta)$, 则 $L(0, \psi) = 1$, 所以海洋水体的光学传递函数为

$$F_{\text{OTF}}(r, \psi) = \frac{\tilde{L}(r, \psi)}{\tilde{L}(0, \psi)} = \exp[-(c - \tilde{\beta})r] = \exp[-D(\psi)r] \quad (3)$$

上式 $D(\psi) = a - \beta(\psi)$ 称为空间频率衰减函数。若已知海洋水体的光学传递函数,则可以求得海水的点扩展函数 F_{PSF}

$$F_{\text{PSF}} = 2\pi \int_0^{\infty} \exp[-D(\psi)r] J_0(2\pi\theta, \psi) \psi d\psi \quad (4)$$

这里 $J_0(2\pi\theta, \psi)$ 为零阶贝塞耳函数。

同时也可求得海水体积散射函数

$$\beta = 2\pi \int_0^{\infty} [c - D(\psi)] J_0(2\pi\theta, \psi) \psi d\psi \quad (5)$$

(4)式和(5)式给出 $\beta(\theta)$ 与点扩展函数 F_{PSF} 的关系,而 $\beta(\theta)$ 为小角度散射函数。其中海水衰减系数 c 可以采用海水透明度仪进行现场测量。

水体点扩展函数 F_{PSF} 的测量已有报道^[4],而本文的测量原理为:非相干光照明物图像 $f(x, y)$, 经路程为 r 的水体被成像系统成像为 $g(x, y)$, 若水体与成像系统的总点扩展函数为 F'_{PSF} , 则有

$$g(x, y) = f(x, y) \circledast F'_{\text{PSF}}$$

设水体的点扩展函数为 F_{PSF} , 成像系统的点扩展函数为 $(F_{\text{PSF}})_0$, 则

$$F'_{\text{PSF}} = F_{\text{PSF}} \circledast (F_{\text{PSF}})_0 \quad (6)$$

在现场测量海水小角度散射函数所需要的精度范围之内,可以认为 $(F_{\text{PSF}})_0 \approx \delta(x, y)$, 也即

与水体相比,成像系统可以视为理想系统,对像质的影响可忽略不计,于是,

$$g(x, y) \approx f(x, y) \otimes F_{\text{PSF}}$$

根据 $f(x, y)$ 、 $g(x, y)$ 即可以求得 F_{PSF} , 进一步可求得 $\beta(\theta)$ 。

3 仪器结构

图 1 为海水小角度散射测量仪结构简图。为操作及维护方便,仪器分为光源系统、CCD 摄像系统及连接器三个相对独立的部分,使用时用拉杆固定在一起,用测量船上的绞车通过钢缆、常平架及 U 形环升降。

光源系统装在圆柱形钢筒内。前有通光孔径 80 mm 的通光窗,为扩大有效角度测量范围,根据散射图像的对称性,采取偏轴设置。窗后为 1 mm 宽的狭缝,狭缝衬在透明朗伯体上,通过朗伯体被一与狭缝平行的日光型荧光灯管照明,形成一均匀稳定的白光非相干光源,以此作为物图像 $f(x, y)$ 。用蓄电池及高频变换电路为光源供电。

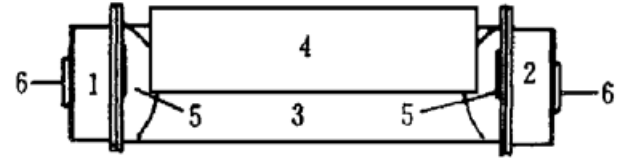


Fig. 1 The configuration of the scatterometer for measuring SASF of sea water. 1: light source, 2: CCD camera, 3: connector, 4: shade, 5: windows, 6: operation apertures

CCD 摄像系统也装在圆柱形钢筒内,通光孔径 70 mm,同轴设置。镜头焦距为 90 mm, CCD 阵列为 512×512 。

光源系统与 CCD 摄像系统均为水密。尾部的操作孔用于箱体出水后的必要操作。

连接器为柱形钢管,其内的水体为待测水体。管壁有通水孔以保证连续测量时待测水体的更新。连接器与拉杆一起连结光箱与 CCD 摄像系统,保证它们的相对定位,并具有足够的刚性。连接器、屏光罩以及内置光阑屏蔽和抑制了水下测量时的杂散光辐射。

仪器全长 1200 mm,总重 50 kg,其中待测水体净长 680 mm。

4 仪器性能分析

由于采用图像记录式测量,不需高精度对准,因此仪器结构简单稳定、适于现场操作。非相干光源可以避免相干噪声,使测量数据相对稳定。用白光光源,则可以通过简单的光学滤波得到不同波段的海水小角度散射函数的光谱数据。

经实测,在水下有效视场直径为 100 mm,由于线光源离轴设置,角度测量的上限大于 5° 。采用 512 线 CCD 接收系统,角度分辨率及角度测量下限为 0.015° 。因为实际海水的小角度散射函数为平滑曲线,为了数据列表及使用方便,通过内插得到 0.01° 的角分辨率是合理的,同时测量下限也外推到 0.01° (在海水小角度散射函数的实际应用中,由于外推 0.005° 对应的空间角很小,这种外推是允许的)。

如果改变接收系统的光学成像参数,则可以得到更大的角度测量范围,但同时降低了角分辨率;但如果采用更多线数的 CCD 阵列,则可以避免角分辨率的降低。

连接器管壁通水孔总面积小于壁面积的 5%,外加屏光罩屏蔽了天顶方向的向下辐照,只有来自下方的微弱海水向上辐照还有一小部分可以由通水孔进入待测水体,但仅 90° 方向的散射可能被探测系统接收,而这恰是散射最弱的方向,再加上连接器内设置了若干光

阑, 可认为已经有效地屏蔽了背景辐射。

对摄像系统采集的图像, 采用 200 线平均, 可以有效地提高信噪比。平均以后得到一维图像, 采用本文作者的算法恢复出海水水体点扩展函数 F_{PSF} , 这种算法可以避免病态问题, 算法的有效性已经验证^[5, 6]。现场数据可以在线处理也可以离线处理, 离线处理可避免使用电缆。

整套仪器在大于 10 个大气压的条件下进行了 48 小时水密实验, 允许在 100 m 以内的水深中安全工作。

在实验室条件下进行了水体小角度散射函数测量的实验, 测量数据表明, 测量误差不超过 5%。图 2 是实验室测量曲线。

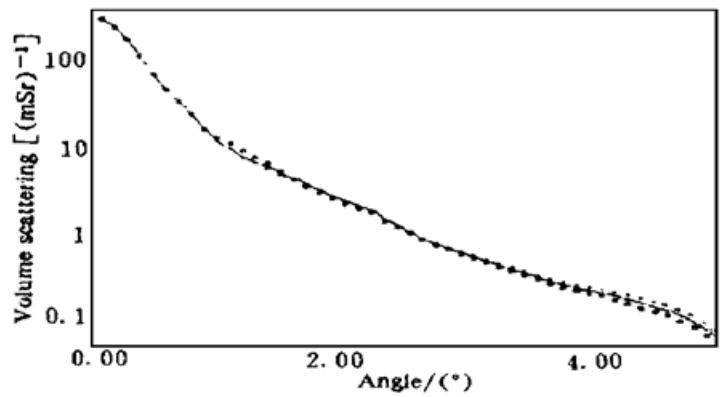


Fig. 2 Measurement of the small angle scattering function at laboratory

5 现场试验

1993 年 10 月, 在东海一系列站位进行了现场测试。每一站位测量了水表面以下不同深度的数据, 最大深度为 60 m。图 3 给出了经数据处理后所得到的海水小角度散射函数的几幅典型曲线。

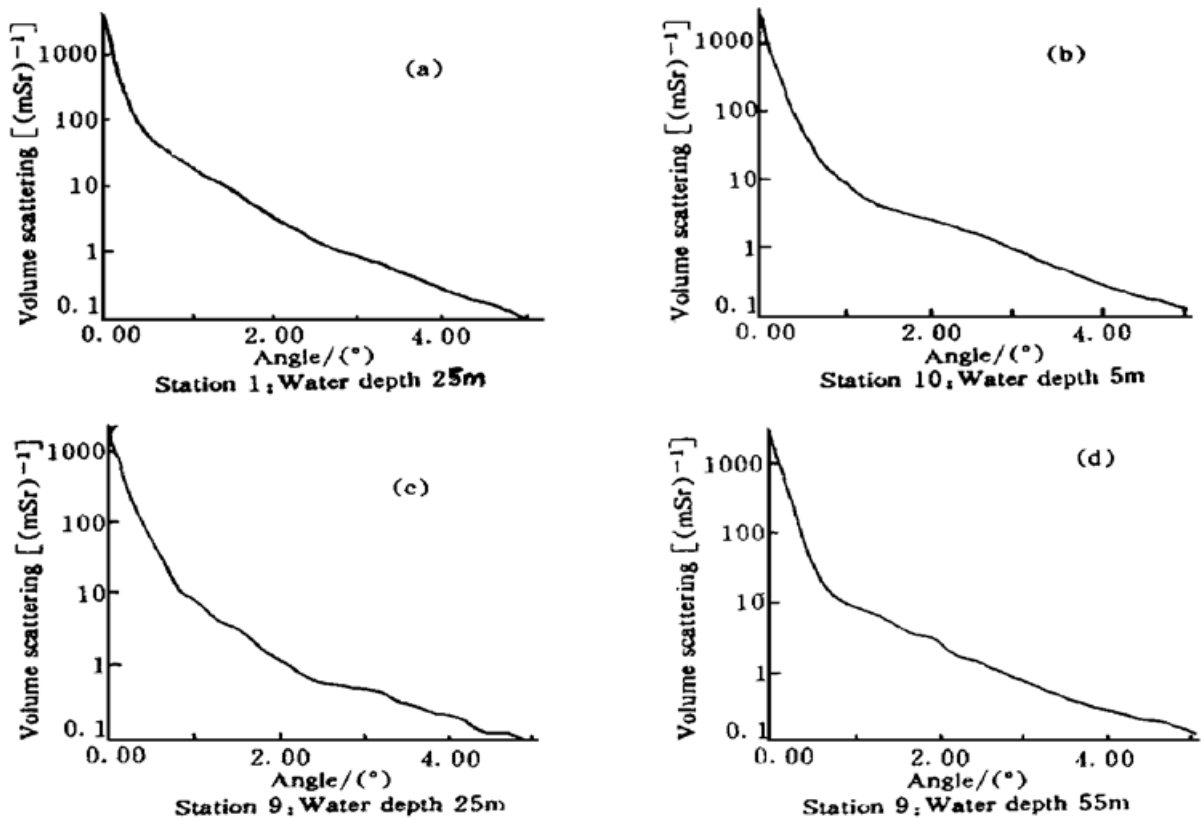


Fig. 3 The curves of the small angle scattering function of different water depth at several stations of the East China Sea

参 考 文 献

- [1] S. Q. Duntley, Light in the sea. *J. Opt. Am.*, 1963, **53**(2) : 214~ 233
- [2] G. Kullenberg, Scattering of light by Sargasso sea water. *Deep-Sea Res.*, 1968, **15**(4) : 432~ 432
- [3] 刘智深, 贺明霞, 海洋辐射传递的 Fourier 光学方法. *中国科学(A)*, 1986, **16**(11) : 1014~ 1021
- [4] Kneneth, J. Voss, Albert L. Chapin, Measurement of the point spread function in the ocean. *Appl. Opt.*, 1990, **29**(25) : 3638~ 3642
- [5] Zhang Ting-lu, Liu Hai, De-bluring the underwater image using the method of Monte Carlo. *Proc. SPIE*, Ocean Optics XII, 1994 : 564~ 567
- [6] Zhang Ting-Lu, Huang Xiaosheng, Liu Zhishen, An image transmission method for measuring small angle scattering function of sea water. *Proc. SPIE*, Ocean Optics XII, 1994, **2258** : 560~ 563

A Scatterometer for Sea Water Scattering Function Measurement

Huang Xiaosheng Wu Dong Zhang Tinglu He Mingxia Liu Zhishen
(*Ocean Remote Sensing Institute, Ocean University of Qingdao, Qingdao 266003*)

(Received 1 April 1998; revised 25 May 1998)

Abstract On the basis of the relationship between the point spread function (PSF) and the small angle scattering function (SASF) of the sea water, A new type of scatterometer for measuring SASF of sea water in situ was built. It can measure F_{PSF} of the sea water body using this instrument and the calculated SASF of seawater from PSF data. The angular resolution is 0.01° , accuracy is 5% and the structure is simple and steady. The data of small angle scattering of sea water in typical area of the East China Sea was obtained.

Key words small angle scattering function, radiation transfer in the sea, point spread function, optical transfer function.