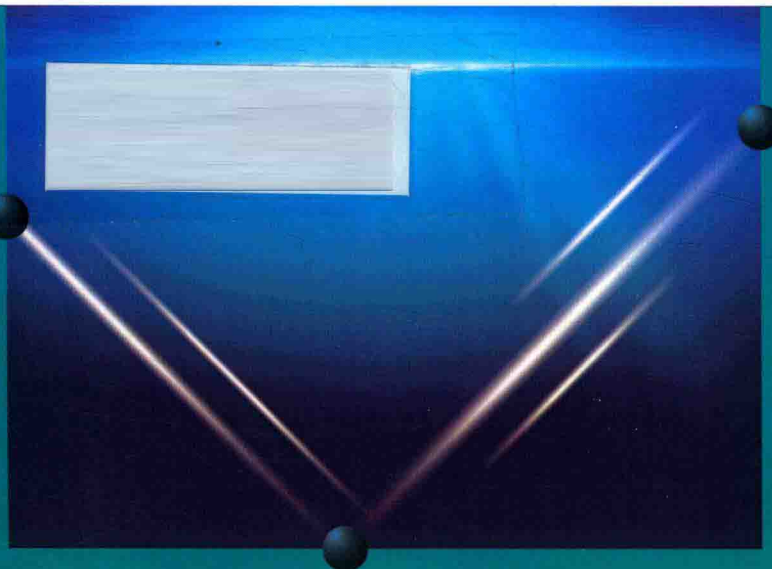


海洋悬浮粒子的 光学散射特性研究

林 宏/著

HAIYANG XUANFU LIZI DE GUANGXUE SANSHE TEXING YANJIU



中国原子能出版社

海洋悬浮粒子的 光学散射特性研究

林 宏/著



中国原子能出版社

图书在版编目(CIP)数据

海洋悬浮粒子的光学散射特性研究 / 林宏著. — 北京 : 中国原子能出版社, 2016. 12

ISBN 978-7-5022-7781-9

I. ①海… II. ①林… III. ①海水—悬浮物—光散射—研究 IV. ①P734.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 319495 号

内 容 简 介

本书对海洋悬浮粒子的光学散射特性进行了研究,主要包括海水光学特性、海洋悬浮粒子的米氏散射特性、海洋悬浮粒子的布里渊散射特性、布里渊散射激光雷达探测系统研究、海洋悬浮粒子监测应用仿真等。本书结构合理,条理清晰,内容丰富新颖,是一本值得学习研究的著作,可供相关人员参考使用。

海洋悬浮粒子的光学散射特性研究

出版发行 中国原子能出版社(北京市海淀区阜成路 43 号 100048)

责任编辑 张 琳

责任校对 冯莲凤

印 刷 北京亚吉飞数码科技有限公司

经 销 全国新华书店

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 14.25

字 数 185 千字

版 次 2016 年 12 月第 1 版 2016 年 12 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5022-7781-9 定 价 42.00 元

网址: <http://www.aep.com.cn>

E-mail: atomep123@126.com

发行电话: 010-68452845

版权所有 侵权必究



作者简介

林宏,男,湖北宜城人,1980年2月出生,副教授,博士研究生。研究方向为激光雷达通信与探测、信号处理、大气光学、海洋光学等相关领域。2007年12月,华中科技大学电磁场与微波技术专业博士研究生毕业,2008年加入湖北工程学院物理与电子信息工程学院工作。

近年来,主持国家自然科学基金青年项目1项、中国博士后科学基金项目1项、湖北省自然科学基金项目1项、湖北省教育厅中青年项目2项、湖北省高等学校青年教师深入企业行动计划项目1项,参与国家重大科研仪器设备研制专项1项、国家973课题2项、国家自然科学基金2项。近年来,共发表科研论文30余篇,其中SCI收录4篇,EI收录12篇,申请专利2项。

工作期间曾获“湖北工程学院科研十佳”、“湖北工程学院教学优秀奖”、“湖北工程学院优秀班主任”等奖项和称号;1项科研成果获湖北省重大科学技术成果认证;曾连续3年共指导3名学生论文被评为湖北省优秀学士学位论文;曾指导学生获湖北省第二届物理实验创新设计竞赛二等奖。

前 言

随着人类对海洋资源开采的加剧以及各种陆地污染物的无节制排放,海洋环境遭到严重破坏,已经影响到人类的生存和发展,因此,海洋环境的监测和保护成为世界各国关注重点。其中,海洋悬浮粒子的光学散射特性不仅直接影响激光在海水中的传输特性,而且是海洋环境光学监测的重要理论基础,成为目前国内外科院所研究的热点问题。本书通过对海洋悬浮粒子米氏散射特性和布里渊散射特性等光学散射特性的研究,提出了利用散射效率因子来计算海洋悬浮粒子散射系数的公式,解决了浮游植物和非色素悬浮粒子等海洋悬浮粒子散射系数计算不准确的问题;提出了利用散射相函数来计算浮游植物和非色素悬浮粒子等海洋悬浮粒子后向散射率的公式,可以准确的计算出海洋悬浮粒子后向散射率的大小;另外,引入了布里渊散射信号功率这一变量,利用布里渊散射信号的频移量和功率两个参量分别建立了海水温度和盐度检测的理论模型,能够有效地实现海水中悬浮粒子大小、密度信息,以及海水温度和盐度信息的实时获取,为实际海洋悬浮粒子监测的实现提供了必要的理论支持和技术指导,具有较强的理论研究价值和实际应用前景。本书的研究成果在海洋赤潮、入海口泥沙等实际海洋环境监测巡航、预报、应急与跟踪监视等方面具有广阔的环境、社会和经济效益前景。

本书共分为七章:第一章阐述了研究海洋悬浮粒子光学散射特性的重要意义;第二章介绍了海水的主要成分及其光学参数;第三章主要分析了海洋悬浮粒子的米氏散射特性;第四章主要分析了海洋悬浮粒子的布里渊散射特性;第五章对布里渊散射激光

雷达探测系统的设计进行了研究;第六章主要结合机载激光雷达技术,对该研究应用于海洋赤潮监测和入海口悬浮泥沙颗粒检测进行了仿真分析;第七章对全书进行了总结,并对未来的工作提出几点建议和展望。

本书在撰写过程中,参考了许多海洋光学特性、激光雷达技术与原理等方面的资料,并且也引用了一些相关专家、学者的研究成果。本书的撰写还得到了湖北工程学院各级领导、同事们的大力支持和帮助,在此表示最诚挚的谢意!由于时间较为仓促,作者水平有限,书中难免存在一些谬误或者措辞不当之处,还恳请广大读者、专家学者提供宝贵的建议和意见,以便本书日后的修改与完善。

作 者

2016 年 8 月

目 录

第一章 概论	1
第一节 研究的意义	1
第二节 国内外研究发展概况	6
第二章 海水光学特性分析	12
第一节 海水主要成分	12
第二节 海水的光学特性参数	19
第三节 海水的光学传输特性	33
第三章 海洋悬浮粒子的米氏散射特性分析	43
第一节 米氏散射理论	43
第二节 海洋悬浮粒子的散射系数特性	49
第三节 海洋悬浮粒子的后向散射率特性	59
第四章 海洋悬浮粒子的布里渊散射特性分析	68
第一节 布里渊散射信号的频移量分析	68
第二节 布里渊散射信号频移量的仿真计算	75
第三节 布里渊散射信号的能量分析	81
第四节 布里渊散射信号能量的仿真计算	87
第五节 海水温度和盐度的测量模型	90
第五章 布里渊散射激光雷达探测系统研究	93
第一节 激光雷达探测系统整体分析	93

第二节	激光雷达探测系统光路研究	96
第三节	鉴频器设计研究	110
第四节	激光器单稳频指标分析	122
第五节	激光器的选择	126
第六章	海洋悬浮粒子监测应用仿真	137
第一节	机载海洋激光雷达探测系统分析	137
第二节	光电倍增管性能研究	144
第三节	海洋赤潮监测应用仿真	151
第四节	入海口悬浮泥沙颗粒检测应用仿真	189
第七章	总结	197
第一节	研究工作的总结	197
第二节	未来工作的展望	201
参考文献		203

第一章 概 论

第一节 研究的意义

海洋是人类赖以生存和发展的空间,蕴藏着极其丰富的自然资源。随着科学技术的不断发展,认识海洋、利用海洋成为人类生存的必然选择,21 世纪是海洋世纪,海洋将成为人类生存的第二环境。在全球陆地资源日趋紧张和环境不断恶化的今天,世界各国纷纷将目光转向海洋,沿海各国不断加大向海洋索取资源的力度和强度,也越来越重视对海洋“蓝色国土”的开发利用和保护。开发海洋资源、发展海洋经济成为各个海洋国家的重要经济支柱,也是全球可持续发展的重要保证。海洋资源开发已经对世界经济的发展做出了重大贡献。海洋能源、资源的开发与利用以及对海洋与全球变化、海洋环境与生态的研究是人类维持自身生存与发展、拓展生存空间、充分利用地球上这块最后的资源丰富的宝地的最为切实可行的途径。海洋开发需要获取大范围、精确的海洋环境数据,需要进行海底勘探、取样、水下施工等。要完成上述任务,需要一系列的海洋开发支撑技术,包括深海探测、深潜、海洋遥感、海洋导航等。

中国海洋局《中国海洋发展报告(2013)》报告分析了中国海洋经济发展的国内外环境,提出了未来 20 年中国海洋经济相关指标的预测数据,包括海洋经济总产值、主要海洋产业、沿海地区经济等。报告认为,至 2030 年,中国海洋经济占 GDP 的比重将

超过 15%，中国海洋经济进入成熟期。“十一五”时期，中国海洋经济年均增长 13.5%。2012 年，在宏观经济形势并不乐观的情况下，海洋经济增长 7.9%，略高于 7.8% 的 GDP 增速，海洋生产总值突破 5 万亿元，占国内生产总值的 9.6%。国家海洋局海洋发展战略研究所研究报告认为，今后海洋经济仍将保持高于或略高于 GDP 增速的发展速度。报告预测，2015 年至 2030 年，中国海洋经济将由不成熟逐渐走向成熟，增长方式将从粗放型向集约型过渡，海洋资源利用效率将大幅度提高。海洋经济对国民经济的贡献率仍将逐步上升，到 2020 年海洋生产总值占 GDP 比重超过 12%，到 2030 年，这一比重超过 15%。

但是，随着人们对海洋资源开采的加剧和各种陆地污染物的无节制排放，海洋环境破坏严重，尤其是海洋赤潮引起的环境灾害较为严重。赤潮是一种世界性的公害，美国、日本、中国、加拿大、法国、瑞典、挪威、菲律宾、印度、印度尼西亚、马来西亚、韩国等 30 多个国家和地区赤潮发生都很频繁。随着现代化工、农业生产的迅猛发展，沿海地区人口的增多，大量工农业废水和生活污水排入海洋，其中相当一部分未经处理就直接排入海洋，导致近海、港湾富营养化程度日趋严重。同时，由于沿海开发程度的增高和海水养殖业的扩大，也带来了海洋生态环境和养殖业自身污染问题；海运业的发展导致外来有害赤潮种类的引入；全球气候的变化也导致了赤潮的频繁发生。首先，赤潮的发生，破坏了海洋的正常生态结构，因此也破坏了海洋中的正常生产过程，从而威胁海洋生物的生存。其次，有些赤潮生物会分泌出黏液，黏在鱼、虾、贝等生物的鳃上，妨碍呼吸，导致其窒息死亡。含有毒素的赤潮生物被海洋生物摄食后能引起中毒死亡。人类食用含有毒素的海产品，也会造成类似的后果。再次是大量赤潮生物死亡后，在尸骸的分解过程中要大量消耗海水中的溶解氧，造成缺氧环境，引起虾、贝类的大量死亡。因此，海洋赤潮引起的灾害受到全世界各国的普遍关注，海洋环境监测相继被世界各国列为重大研究课题^[1~4]。

世界上经济发达的海洋国家,以及有关国际组织,都很重视海洋环境灾害的预警和防御。海洋环境灾害(现象)发生、发展、移行和消失的监视监测,是预警和防御体系最重要和最基本的内容。全球范围的海洋环境灾害监视监测是通过海洋监测(或观测)网实现的。

通常,海洋环境监测网包括以下内容:

(1)岸边及岛屿海洋站观测。一般包括全部的海面气象观测和海洋水文观测,但专业海洋站往往只进行单项观测,如测波站、验潮站(海平面观测)、污染监测站、海冰观测站等。

(2)船舶观测。船舶观测包括使用海洋调查船的海洋标准断面监测和大面观测,以及使用各类交通运输、渔业、油气勘探船(或平台)的辅助观测。

(3)海洋浮标观测。包括建造专用的锚定海洋资料浮标,以锚泊方式固定于特定的海洋测站上进行记录,或漂流(海洋资料)浮标,随风和海流漂移在海上,并由卫星对其定位和收集资料数据的观测。除用浮标监测海洋气象和海面的海洋环境要素外,现还正在发展水下遥测系统,以便获取海面以下的海洋环境资料。

(4)水下及海底系统观测。水下及海底系统的发展除了因为要进行水下及海底探测外,更主要的还是因为一定深度的水下和海底较为“安静”,可以比较安全地系泊或安放仪器,以便对水面、水体、海底的环境及其变化进行监测。

(5)遥感监测。航天(卫星)、航空(飞机,包括飞机探测)和陆基(岸边、船舶雷达)遥感,是近几十年来迅速发展的,对海洋灾害监视监测非常有效的手段。它更具有快速、大范围和全天候的特点,因此更适用于海洋灾害的监视监测。

20世纪70年代左右开始,激光器、光电技术以及计算机的发展在较大程度上促进了激光探测海洋技术的发展,90年代中期激光与光电子的发展,特别是新颖的固体激光材料的研制,半导体泵浦激光器的发展,以及高灵敏度光电阵列探测器的发展,使机载海洋激光雷达发展成为海洋环境监测的重要手段^[5~8]。目前

机载激光雷达已被广泛运用于海洋科学研究,包括浅海水深、海底地貌测绘、海洋赤潮、海洋叶绿素浓度、海表油污、海洋污染以及海浪特性等测量研究。军事上也具有巨大的应用潜力,如海下通信、海下成像、水下潜艇探测、水雷探测等^[9~13]。

由于上述应用的需要,对海水的光学特性的研究就显得尤为重要。海水的光学特性决定着激光束在海水传输过程中的能量和光强时空分布的变化,也决定着激光回波信号的特征。海水的光学特性一般用相应的光学参数来表征,海水的光学参数是研究水中光学传输特性以及水下光学探测所必需的参数,是海洋科学研究、开发和应用的理论基础。在研究水下激光脉冲的传输过程时,海水对光场的作用结果都可以归结为它们对光场的衰减作用,因而我们对于海水光学性质的讨论总是从导致光场衰减的因素出发。激光束在海水中的传输的衰减,主要是由海水水分子、浮游植物和非色素悬浮粒子等对光束的吸收和散射作用引起的。尤其是海洋中的浮游植物和非色素悬浮粒子等的光学散射特性不仅直接影响激光在海水中的传输特性,而且是海洋环境光学监测的重要理论基础。

海水的光散射特性相对于其吸收特性来说比较复杂,当一束光射入海水中时,经过光与海水的相互作用,会发生弹性散射和非弹性散射。弹性散射光没有发生频移变化,但是散射特性与入射光的波长、海水的属性以及海水中悬浮粒子的大小、密度等有关。弹性散射主要包括瑞利散射、米氏散射和无选择性散射三类。在海水中引发光弹性散射的散射元主要是海水水分子和海洋悬浮粒子,其中海水中的水分子主要引起的是瑞利散射,而海洋悬浮粒子主要引起的是米氏散射。通过研究海洋悬浮粒子的米氏散射特性,可以得到海洋中各种悬浮粒子的大小、密度等信息。光与海水产生的另一类散射是非弹性散射,这类散射存在散射光的频率相对于入射光的频率发生移动的频移变化。非弹性散射又分为两类:拉曼散射与布里渊散射。拉曼散射与物质的分子结构有关,而布里渊散射实际上是由多普勒效应引起的。海水

中的布里渊散射特性与温度和盐度等密切相关。通过分析海洋悬浮粒子的布里渊散射特性,可以构建海洋悬浮粒子水体的温度和盐度检测模型。

通常情况下,海水中的水分子比光波波长小很多,可以用瑞利散射理论来描述其散射特性;而海洋悬浮粒子主要包括浮游植物和非色素悬浮粒子这两大类,其粒子的密度、大小、分布极其复杂,还没有严格的描述理论,必须采用等效球的米氏散射理论来研究其散射特性。通常情况下,海水中粒子的散射特性主要包括散射系数特性和后向散射率特性。目前,利用瑞利散射理论研究水分子的散射特性已经比较成熟,而针对海洋中浮游植物散射系数的研究,较多的采用基于叶绿素浓度的经验公式来计算其散射系数的大小,具有一定的误差,同时通过经验公式难于分析其散射系数特性;针对海洋中复杂的非色素悬浮粒子,则主要依靠经验公式来计算其散射系数,目前还有很多不成熟的地方,存在较大的误差,而且也难于分析其散射系数特性。同时,描述海水中浮游植物和非色素悬浮粒子后向散射率的严格理论还不存在,使得其后向散射率的具体数值一直难于计算。另外,目前利用布里渊散射技术检测海水温度信息是通过检测海水中布里渊散射信号的频移量来实现的,在这一过程中,通常是假定海水的盐度为一定值,这样就存在较大测量误差,同时这种技术还不能够测量海水的盐度信息,不能满足海洋环境监测的需要。

本书针对上述问题重点利用等效球的米氏散射理论分析研究了海水悬浮粒子的散射特性,首先提出了利用散射效率因子计算海洋悬浮粒子散射系数的公式,解决了浮游植物和非色素悬浮粒子等悬浮粒子散射系数计算不准确的问题,同时根据计算公式可以有效分析海洋浮游植物和非色素悬浮粒子的散射系数特性。接着,提出了利用散射相函数计算浮游植物和非色素悬浮粒子等悬浮粒子后向散射率的公式,可以准确地计算出悬浮粒子后向散射率的大小,同时也可以有效地分析其后向散射率特性。文章在分析海水布里渊散射特性的基础之上,引入了布里渊散射信号的

功率这一变量,利用布里渊散射信号的频移量和功率两个参量分别建立了海水温度和盐度检测的理论模型,能够实现对海水温度和盐度的检测。文章通过对海洋悬浮粒子米氏散射特性和布里渊散射特性的研究,能够有效地实现对海水中各种悬浮粒子大小、密度信息,以及海水温度盐度信息的获取,为实际海洋环境监测的实现提供了必要的理论支持和技术指导,在海洋赤潮、入海口悬浮泥沙等海洋环境监测巡航、预报、应急与跟踪监视等方面具有广阔的环境、社会和经济效益前景。

第二节 国内外研究发展概况

1963年,S. A. Sullivan 和 S. Q. Duntely 等人^[14~15]发现在海水中存在一个类似于大气的透光窗口,海水对 $0.47\sim 0.58\ \mu\text{m}$ 之间波长范围内的蓝绿光的衰减系数较小。这一重要发现激起了人们试图利用蓝绿光探测水下目标的欲望。1968年,美国 Syracuse 大学研制出世界上第一个激光海水深度测量系统^[16],首次阐述了激光水深测量技术的可行性,初步建立了海洋激光雷达技术的理论基础。70年代末 NASA、NOAA 又联合研制了一种具有扫描和高速数据记录能力的机载海洋激光雷达 AOL^[16~17] (Airborne Oceanographic Lidar)。此后,随着 Nd:YAG 激光器的出现,机载激光雷达系统的研究进入了一个新的高潮。90年代,加拿大的 OPTECH 公司为美国 Army Corps Of Engineers 研制了一种实用的水文勘测系统 SHOALS^[18~19] (Scanned Hydrographic Operational Airborne Lidar Survey)。与此同时,澳大利亚国防和科技组织 (Australian Defence Science And Technology Organization) 为澳大利亚海军研制了一种称为 LADS^[20~21] 的实用机载激光水文勘测系统。瑞典国防研究院也成功研制出了直升机 FLASH 系统进行激光测深试验,并于 90 年代末将其改进为更实用的 HawkEye 系统^[22~23]。

综上所述,20 世纪 90 年代以后,美国、澳大利亚和瑞典分别研制出 SHOALS、LADS 和 HawkEye 三套实用的机载激光雷达系统,并且尝试将机载激光雷达应用于海洋测深、绘制海底地形地貌、探测海洋油污以及悬浮物浓度等诸多领域。目前,机载激光雷达已成为各国海洋环境监测的重要手段,具有广阔的应用前景。

正是由于机载激光雷达系统逐渐成为海洋环境监测的重要手段以及应用范围的逐渐扩大,使得激光在海水中传输理论的研究越来越重要。海水中各种物质,尤其是海洋悬浮粒子的光学散射特性不仅直接影响激光在海水中的传输特性,而且是海洋环境光学探测研究、开发和应用的理论基础。

光散射理论的研究开始于 19 世纪的 70 年代。1871 年,瑞利 (Lord Rayleigh) 首先从理论上解释了光的散射现象,并通过对远小于光波波长的微粒散射进行的精密研究,提出了著名的瑞利散射定律,并用电子论的观点解释了光散射的本质^[24]。瑞利散射的特点是散射光强度与入射光波长的四次方成反比,定律的适用条件是散射体的尺寸要比光波波长小得多。1908 年,米氏 (G. Mie) 通过电磁波的麦克斯韦方程组,解出了一个关于光散射的严格解,得出了任意直径、任意成分的均匀粒子的散射规律,这就是著名的米氏理论^[24]。当散射体的尺寸比光波波长小的多时,米氏散射可以近似简单描述和瑞利散射理论相似的结果;当散射体的尺寸比光波波长大的多时,米氏散射的结果又近似与几何光学描述的结果相一致;而在散射体的尺寸和光波波长相比拟的范围内,只有用米氏散射才能得到唯一正确的结果。所以,米氏散射理论计算模式具有能广泛地描述任何尺度参数均匀球状粒子散射的特点。1951 年, A. L. Aden 和 M. Kerker^[24] 提出小粒子 Mie 散射的级数解,又独立地给出了球形复合粒子的散射截面和消光截面。人们并没有马上将其成功地应用于实际光散射计算,主要原因是在 Mie 级数中包含大量的各阶贝塞尔函数和汉克尔函数的计算,很难计算出结果。随着计算机技术的发展,使这种计算

成为可能,对小粒子的光散射研究进入新的时期。

1954年,美国科学家 H. Davies 在研究雷达波被海洋表面散射时发现,雷达波被海洋表面的散射是与海洋表面形貌的统计参数密切相关的^[25]。由于光波与雷达波本质上都是电磁波,因此 Davies 的研究成果很快受到了光学界的注意,并被立即引申到了光学领域。利用光散射技术测量海洋表面形貌迅速成为了一项新技术。1957年, H. C. Van de Hulst 出版了关于微小粒子光散射现象的专著,总结了微小粒子散射的普遍规律,受到科技界人士的广泛注意。这本专著被认为是光散射理论领域的经典文献^[26],他们的工作奠定了研究散射介质中光传播的理论基础。1969年, M. Kerker 系统论述了光及电磁波散射的一般规律,为散射理论的进一步发展做出了贡献^[27]。1976年, J. Swithenbank 等人利用米氏理论在散射粒子的直径大于光波波长时的近似式——夫琅和费 (Fraunhofer) 衍射理论,发展了激光粒度测量仪^[28],开辟了散射理论在计量测试中的又一新领域。由于光散射测粒法适用范围宽,测量时不受颗粒光学特性及电学特性等参数的影响,因此,在不到二十年的时间里已成为粒度计量中最为重要的测量方式之一。

此后,随着现场测量仪器的发展,激光在海水中的传输理论在现场数据的验证下得到很大发展, Bricaud 和 Zaneveld 等^[29~30]不断改进现场测量总吸收系数的方法,对水体成分的吸收特性展开了研究。还有许多研究者从各方面研究水体的散射特性,如 Haltrin^[31]等利用单波段体散射函数计算水体后向散射系数与散射系数的关系, Sathyendranath^[32]等主要针对一类水体来研究散射系数的光谱关系。20世纪70年代 Smith, Baker 等提出海洋生物光学 (bio-optics) 概念^[33],利用海洋生物所含叶绿素的浓度来研究海洋浮游植物等悬浮粒子的吸收和散射特性。Andre Morel 从20世纪80年代开始从事海洋生物-光学模型参数化研究,在1981年提出适用于 I 类水体的 Morel 模型^[34]。Morel 主要是通过前人的经验数据,建立了依据叶绿素浓度反演海洋浮游植物的

吸收系数和散射系数的模型,该模型适用的叶绿素浓度范围为 $0.01 \sim 10 \text{ mg/m}^3$ 。

1983年,C. F. Bohren, O. R. Huffman 等人^[35]综合前人的成果,发表了关于海水中微小粒子对光的散射及吸收的一般规律,为光在海水中的吸收和散射理论的进一步发展做出了贡献。随后,Gordon^[36]等针对Ⅰ类水体也开展了单位后向散射系数的研究,并在此之后对 Morel 模型进行了多次修正,扩大了其适用范围,在1992年提出了适用于Ⅱ类水体的 Gordon 模型^[37]。Ⅰ类水体主要包含海水中的水分子和海水中的浮游植物两大类,Ⅱ类水体相对比较复杂,不仅包括海水中的水分子和浮游植物,还包括海水的非色素悬浮粒子和黄色物质等。国内中国海洋大学的刘智深、张凯临、贺岩等人也开展了利用机载激光雷达测量海水中叶绿素 a 浓度的相关研究^[38~39]。由于海洋浮游植物对光的吸收作用是靠其所含叶绿素来完成的,利用叶绿素浓度来描述海洋浮游植物的吸收特性已经获得很好结果,但是海洋浮游植物对光的散射特性是和其粒子大小、密度等有关的,和叶绿素浓度没有直接关系,用叶绿素浓度的经验公式来反演海洋浮游植物的散射特性还存在一定的误差。

与此同时,关于海洋中布里渊散射特性的研究已经有很长的历史了,最早是用来测量海水中的声速^[40~42]。美国人 Hirschberg 在20世纪70年代就提出了利用激光布里渊散射测量海洋水下声速、温度和盐度参数的建议^[43]。Guagliardo 等人进行了最早期的脉冲激光测量的实验研究工作^[44]。在1984年的国际 SPIE 会议上,Donald 等^[45]综述了利用包含布里渊散射和拉曼散射在内的光散射方法测量海水温度、盐度以及声速的方法,在布里渊散射测量声速中使用了利用法布里-珀罗干涉仪,测量精度可达 $\pm 2.0 \text{ m/s}$ 。同年,Hirschberg 等^[46~47]报道了利用布里渊散射测量海水中的温度和声速,利用法布里-珀罗干涉仪分析后向散射光谱,由布里渊散射光的频移确定声速。由声速、深度和盐度推出温度,根据回波信号与发射信号的时间延迟确定探测的深