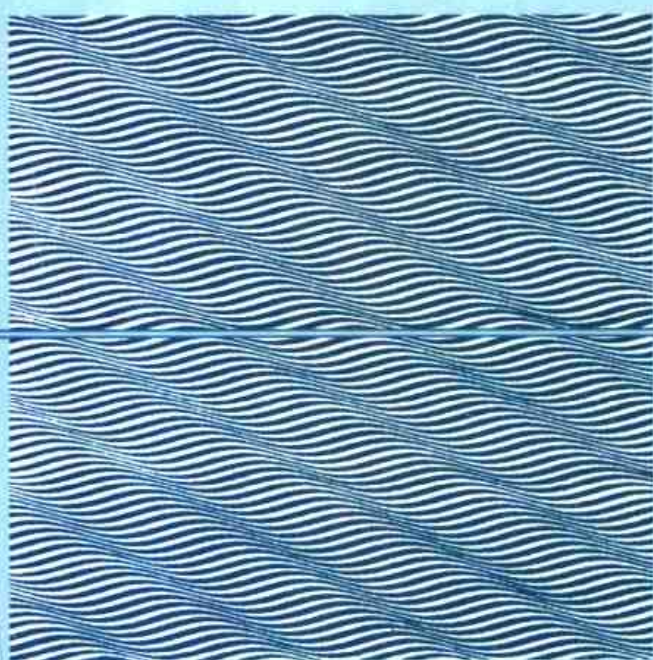


# 蓝绿激光雷达海洋探测

## Blue-Green Lidar Ocean Survey

徐启阳 杨坤涛 王新兵 许德胜 编著



国防工业出版社

# 蓝绿激光雷达海洋探测

## Blue-Green Lidar Ocean Survey

徐启阳 杨坤涛  
王新兵 许德胜 编著

国防工业出版社

·北京·

**图书在版编目(CIP)数据**

蓝绿激光雷达海洋探测/徐敬阳等编著. —北京:国防工业出版社, 2002. 7

ISBN 7-118-02817-7

I. 蓝... II. 徐... III. 激光雷达: 机载雷达—海洋—探测 IV. P715.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 008780 号

**国防工业出版社** 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

北京奥隆印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 850×1168 1/32 印张 9 $\frac{3}{4}$  244 千字

2002 年 7 月第 1 版 2002 年 7 月北京第 1 次印刷

印数: 1—2000 册 定价: 22.00 元

---

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

# 致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。

2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。

3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。

4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

**国防科技图书出版基金  
评审委员会**

# 国防科技图书出版基金 第四届评审委员会组成人员

名誉主任委员 陈达植

顾问 黄宁

主任委员 殷鹤龄

副主任委员 王峰 张涵信 张又栋

秘书长 张又栋

副秘书长 崔士义 蔡镛

委员 于景元 王小谟 甘茂治 冯允成

(按姓名笔画排序) 刘世参 杨星豪 李德毅 吴有生

何新贵 佟玉民 宋家树 张立同

张鸿元 陈火旺 侯正明 常显奇

崔尔杰 彭华良 韩祖南 舒长胜

## 前 言

蓝绿激光雷达海洋探测涉及激光、雷达、大气物理、海洋光学、信号探测和处理、传统的光学与成像、计算机和机械等多学科的理论和技术,国内外已发表的论文多为单项研究成果的论述,而缺少对蓝绿激光雷达海洋探测理论、技术和应用进行全而和较系统的描述。从1968年美国建造了世界上第一个激光海水深度测量系统之后,世界上技术先进的国家先后开展了对机载激光雷达海洋探测的研究,其发展迅速。本书作者承担了国家项目,在这个领域已开展多年的研究工作,根据国内外的研究发展情况,整理和分析了所积累的文献资料,及时地进行了总结和研究并编著了此书。本书全面地描述了机载激光雷达海洋探测的理论、技术和应用,建立了较为完整的机载激光雷达海洋探测理论体系,总结了国内外的先进技术和研究成果,对推动这个领域的研究和发展将起到促进作用,对于国防建设及开发利用我国丰富的海洋资源也有重要的价值。

全书共分十章。徐啟阳教授为主编,撰写了第一、二、三、四、五、七、十章,并负责全书统编工作。杨坤涛教授撰写第八章。王新兵副教授撰写第九章,并参与第四、七、十章部分文献资料的翻译。许德胜高工撰写第六章,并参与各章文字和插图的审查和修改。作者要特别感谢干福熹院士和刘颂豪院士对本书的具体指导,感谢李再光教授、李正佳教授、程祖海教授、朱晓教授、杨克成副教授、赵晓杰博士、陈文革博士、孙义秀讲师,以及课题组其他全体成员对本书编著所提供的帮助和支持。

由于作者的水平有限,本书难免存在一些缺点和不足之处,请读者批评指正。

作者

2001年8月



# 目 录

第一章 概论	1
1.1 历史和背景	1
1.2 研究发展概况	4
1.2.1 初始阶段	4
1.2.2 发展阶段	5
1.2.3 实用试验阶段	7
1.3 机载激光雷达海洋探测简介	10
参考文献	10
第二章 激光束通过大气以及大气—海水界面的传输特性	13
2.1 激光束在大气中的传输	13
2.1.1 大气物理	13
2.1.2 光束的大气传输特性	14
2.2 激光束在大气—海水界面的传输	27
2.2.1 海面泡沫反射率	27
2.2.2 激光束通过风浪海面的光学特性	28
参考文献	34
第三章 激光束在水中的传输特性及理论模型	36
3.1 海水的光学性质	36
3.1.1 海水成分与光学特性	36
3.1.2 海水光学参数的基本定义	39
3.2 海水的光衰减特性	41
3.2.1 海水的吸收光谱	41
3.2.2 海水的光散射	44
3.2.3 光在海水中的衰减	48

3.3	海水中激光束传输特性	51
3.3.1	准直光束在海水中的传输	51
3.3.2	准直光束在海水中传输的唯像理论模型	52
3.4	太阳光在水下的传输特性	56
3.4.1	太阳光的辐射频谱及强度	56
3.4.2	太阳和天空背景光辐射水下传输	58
	参考文献	60
<b>第四章</b>	<b>海洋探测机载激光雷达方程</b>	<b>62</b>
4.1	机载激光测深唯像雷达方程	62
4.1.1	激光束从海面到海底的传输过程	63
4.1.2	水下有限尺寸光源距离定律	64
4.1.3	机载激光测深唯像雷达方程的建立	65
4.2	海水后向散射激光雷达方程	67
4.2.1	海水后向散射	67
4.2.2	海水后向散射激光雷达方程	68
4.3	含鱼群因素机载激光雷达瞬态辐射转移方程	70
4.3.1	辐射转移方程表达式	71
4.3.2	求解辐射转移方程	74
4.3.3	海水和鱼群对探测信号的影响	76
4.4	含水下小目标回波模型机载激光雷达探测理论 分析	79
4.4.1	机载激光雷达系统的波形模型	80
4.4.2	海底回波信号模型	85
	参考文献	91
<b>第五章</b>	<b>激光雷达海洋探测系统及参数计算</b>	<b>93</b>
5.1	激光雷达海洋探测系统	93
5.1.1	机载激光雷达海洋探测系统	93
5.1.2	无线电雷达辅助激光雷达海洋探测系统	97
5.2	激光雷达截面和接收机信噪比	100
5.2.1	激光雷达截面(LRCS)	100

5.2.2	接收机信噪比(SNR) .....	101
5.3	激光雷达海洋探测系统参数计算 .....	103
5.3.1	系统设计考虑因素 .....	103
5.3.2	系统内参数 .....	105
5.3.3	系统外参数 .....	113
5.4	世界各国典型系统的参数比较 .....	121
	参考文献 .....	127
<b>第六章</b>	<b>机载蓝绿激光器</b> .....	<b>128</b>
6.1	激光器的选择 .....	128
6.1.1	激光波长 .....	128
6.1.2	激光功率 .....	129
6.1.3	具体基本要求 .....	129
6.2	性能及特性 .....	130
6.2.1	铜蒸气激光器 .....	130
6.2.2	高脉冲能量染料激光器 .....	131
6.2.3	HgBr 准分子激光器 .....	132
6.2.4	XeCl 准分子激光拉曼频移器件 .....	132
6.2.5	其他蓝绿光器件 .....	133
6.2.6	调 Q Nd:YAG 倍频激光器 .....	134
6.3	比较与选择 .....	134
6.4	机载蓝绿激光器基本方案 .....	138
6.4.1	调 Q 方式的比较 .....	139
6.4.2	选择电光调 Q 方式 .....	142
6.5	电光调 Q Nd:YAG 倍频激光器 .....	142
6.5.1	光学谐振腔优化设计 .....	142
6.5.2	高效晶体倍频 .....	147
6.5.3	高性能泵浦源 .....	148
	参考文献 .....	155
<b>第七章</b>	<b>信号探测与信号处理</b> .....	<b>156</b>
7.1	信号探测方式 .....	156

7.1.1	探测方式的选取 .....	156
7.1.2	探测器件的选取 .....	157
7.1.3	激光信号的探测 .....	159
7.2	光电倍增管变增益探测方法 .....	165
7.2.1	PMT 变增益控制工作原理 .....	166
7.2.2	光电倍增管增益控制特性 .....	167
7.2.3	PMT 变增益探测方法应用 .....	169
7.3	大动态范围激光回波信号的偏振检测方法 .....	170
7.3.1	偏振检测方法 .....	170
7.3.2	偏振检测实验 .....	171
7.4	窄带干涉滤波器与 YAG 调 Q 倍频激光器的匹配 .....	174
7.4.1	中心波长和线宽 .....	175
7.4.2	干涉滤波器的特性 .....	176
7.4.3	与激光波长的匹配 .....	180
	参考文献 .....	184
<b>第八章</b>	<b>光学发射与接收系统</b> .....	<b>186</b>
8.1	概述 .....	186
8.1.1	国外海洋探测激光雷达光学系统简介 .....	186
8.1.2	光学系统在激光雷达中的功能 .....	189
8.1.3	光学系统总体设计方案 .....	189
8.2	光扫描系统 .....	193
8.2.1	矩形扫描器 .....	194
8.2.2	卵形螺旋线扫描机构 .....	196
8.2.3	位置编码系统 .....	199
8.3	激光发射系统 .....	201
8.3.1	可变倍激光准直扩束系统设计 .....	202
8.3.2	高斯光束的变视场发射系统 .....	206
8.4	光接收系统 .....	211
8.4.1	蓝绿光(GR)接收系统的分类 .....	211
8.4.2	光接收物镜 .....	213

参考文献	217
<b>第九章 水下激光成像探测</b>	<b>218</b>
9.1 激光水下成像技术	218
9.2 激光扫描水下成像	219
9.2.1 激光扫描水下成像技术	219
9.2.2 激光扫描水下成像系统的 MTF 分析	219
9.2.3 激光扫描水下成像系统成像距离分析	224
9.2.4 激光扫描水下成像系统结构	226
9.2.5 激光扫描水下成像	227
9.3 距离选通的激光水下成像	229
9.3.1 距离选通成像技术	229
9.3.2 距离选通成像系统的调制传递函数	230
9.3.3 距离选通成像系统的成像距离分析	231
9.3.4 距离选通成像系统及实验	236
9.4 高分辨率三维水下成像系统	242
9.4.1 引言	242
9.4.2 条纹管成像技术	243
9.4.3 三维激光水下成像	244
9.5 水下物体的偏振成像识别技术	245
9.5.1 引言	245
9.5.2 基本原理	245
9.5.3 成像识别系统	247
9.5.4 水下物体偏振成像识别	247
参考文献	249
<b>第十章 蓝绿激光雷达海洋探测</b>	<b>252</b>
10.1 海底地貌测绘及海洋深度探测	252
10.1.1 澳大利亚 LADS 系统对海底地貌测绘	252
10.1.2 美国 SHOALS 系统探测和水下成像探测	259
10.1.3 瑞典 FLASH 和 Hawk Eyc 系统测深	264
10.1.4 中国 CALYT 系统测深	265

10.2 水下目标探测·····	272
10.2.1 水下军事目标探测·····	272
10.2.2 鱼群的探测·····	278
10.2.3 探测暗礁和海难勘查·····	283
10.3 其他海洋探测·····	285
10.3.1 探测海洋水下资源·····	285
10.3.2 探测海洋浮游生物·····	286
参考文献·····	287
内容简介·····	289

# Contents

<b>Chapter 1 Introduction</b> .....	1
1.1 History and background .....	1
1.2 View of the research and developments .....	4
1.2.1 The initial stages .....	4
1.2.2 Development .....	5
1.2.3 Test and applications .....	7
1.3 The brief introduction of airborne lidar ocean survey ..	10
Reference .....	10
<b>Chapter 2 Transmission of the laser beam through           atmosphere and ocean surface</b> .....	13
2.1 Transmission of the laser beam through atmosphere ..	13
2.1.1 Atmosphere physics .....	13
2.1.2 The characteristics of the laser beam in atmosphere .....	14
2.2 Transmission of the laser beam through ocean surface .....	27
2.2.1 The reflectivity of the foam on ocean surface .....	27
2.2.2 The characteristics of the laser beam through wavy ocean surface .....	28
Reference .....	34
<b>Chapter 3 Transmission of the laser beam in the water           and its theoretical model</b> .....	36
3.1 Seawater optical property .....	36
3.1.1 Seawater ingredient and its optical property .....	36

3.1.2	Seawater optical parameters .....	39
3.2	Light attenuation in seawater .....	41
3.2.1	Absorption spectrum in seawater .....	41
3.2.2	Light scatter in seawater .....	44
3.2.3	Light attenuation in seawater .....	48
3.3	Transmission of the laser beam in the water .....	51
3.3.1	Transmission of collimated laser beam in the water .....	51
3.3.2	Transmission theoretical model of collimated laser beam in the water .....	52
3.4	Transmission of the sunlight under the water .....	56
3.4.1	Radiation spectrum and intensity of the sunlight .....	56
3.4.2	Transmission of sun and sky light underwater ...	58
	Reference .....	60
<b>Chapters 4</b>	<b>Airborne lidar equations in ocean survey .....</b>	<b>62</b>
4.1	Airborne laser bathymetry phenomenological lidar equation .....	62
4.1.1	Transmission of laser beam from ocean surface to ocean bottom .....	63
4.1.2	The range law of underwater limited light .....	64
4.1.3	Foundation of Airborne laser bathymetry phenomenological lidar equation .....	65
4.2	Lidar equation of seawater backscatter .....	67
4.2.1	Seawater backscatter .....	67
4.2.2	Foundation of Lidar equation of seawater backscatter .....	68
4.3	Transient radiation transfer equation applied to oceanographic lidar with shoal .....	70
4.3.1	Formula of the radiation transfer equation .....	71



4.3.2	Solution of the radiation transfer equation	74
4.3.3	The effects of seawater and shoal on the detection	76
4.4	Theoretical analysis from small objects in lidar bathymetry	79
4.4.1	Waveform model for lidar bathymetry	80
4.4.2	Waveform model for the signal from bottom elements	85
	Reference	91
<b>Chapter 5 System and parameters calculation of lidar ocean survey</b>		93
5.1	lidar ocean survey system	93
5.1.1	Airborne lidar ocean survey system	93
5.1.2	Hybrid lidar-radar for ocean exploration	97
5.2	Laser radar cross section and rate between signal and noise on the receiver	100
5.2.1	Laser radar cross section	100
5.2.2	Rate between signal and noise on the receiver	101
5.3	Parameters calculation of lidar ocean survey system	103
5.3.1	Consideration of the system design	103
5.3.2	Internal parameters of the system	105
5.3.3	External parameters of the system	113
5.4	Comparison of various typical systems in the world	121
	Reference	127
<b>Chapter 6 Airborne blue-green lasers</b>		128
6.1	The choice of the lasers	128
6.1.1	Laser wavelength	128
6.1.2	Laser power	129