

激光雷达原理

The Principle of Lidar

戴永江 编著



国防工业出版社

激光雷达原理

The Principle of Lidar

戴永江 编著

国防工业出版社

·北京·

2021026

图书在版编目(CIP)数据

激光雷达原理/戴永江编著. - 北京:国防工业出版社,2002.1

ISBN 7-118-02557-7

I. 激... II. 戴... III. 激光雷达—通信理论
IV. TN958.98

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 029276 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^{3/4} 246 千字

2002 年 1 月第 1 版 2002 年 1 月北京第 1 次印刷

印数:1-3000 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 第三届评审委员会组成人员

名誉主任委员	怀国模			
主任委员	黄宁			
副主任委员	殷鹤龄	高景德	陈芳允	曾铎
秘书长	崔士义			
委员	于景元	王小谟	尤子平	冯允成
(以姓氏笔划为序)	刘仁	朱森元	朵英贤	宋家树
	杨星豪	吴有生	何庆芝	何国伟
	何新贵	张立同	张汝果	张均武
	张涵信	陈火旺	范学虹	柯有安
	侯正明	莫悟生	崔尔杰	

前 言

1961年世界上第一台红宝石激光器问世不久,以测距为主要功能的激光测距雷达便诞生了。激光雷达技术的发展从一开始就和航天技术紧密结合在一起。最早的星载激光雷达是由美国国际电话和电报公司研制的用于航天飞行器交会对接的激光雷达。以后又扩展到研究用于对洲际导弹和其他飞行器的瞄准和跟踪的激光雷达。

最早用于研究地球科学的星载激光雷达是测量全球对流层风场的 CO_2 相干激光雷达。但是 CO_2 相干激光雷达在性能上和使用上存在许多问题。最突出的是寿命短、性能不稳定、结构复杂笨重和成本高,长期处在徘徊状态。

20世纪90年代以来,二极管激光泵浦的全固态激光系统技术(Diode Pump Solid System, DPSS),较好地解决了激光雷达的实用化和商品化的关键技术问题,拉动了相关技术的发展,开辟了高精度绘图、远程测距、环境监测、测云、测地被、测目标和非相干测风等应用领域,显示出巨大的科学技术、经济效益和军事价值,因此,在美、欧和日本等发达国家都大力发展起来。

在新世纪中,激光雷达正在向多功能、多波段、高性能、高可靠性和小型化发展,在国防建设和国民经济中展示着美好的应用前景

激光雷达技术是以激光发射和接收技术为基础的。这一基础在激光测距、激光制导、激光跟瞄、激光通信和其他激光技术都有广泛的应用。因此,掌握好激光雷达技术对促进其他激光技术的

发展也有重要意义。

激光雷达技术还涉及激光和物质相互作用的机理,例如激光和大气的相互作用,激光和各类探测目标的相互作用,激光和生物组织的相互作用。了解这些规律对研制性能好的激光雷达,开展激光雷达的应用研究是必要的。

在上世纪末发生的几场高技术局部战争中,激光技术都发挥了较大作用。在大气环境监测和气象预报中,激光雷达也有重要地位。特别是 20 世纪 90 年代中期,二极管激光泵浦全固态激光雷达的出现,展示了低价位、高效能、全自动的商品化激光雷达的美好应用前景。作者痛感需要为激光雷达的研制、教学、生产和使用部门编写一本有关激光雷达的基础性书籍的必要性。

本书分 6 章,第 1 章介绍激光雷达的原理。第 2 章介绍激光的大气传输特性,这对激光雷达的研制和大气中的应用是必要的。第 3 章从激光雷达系统特性的角度介绍激光雷达的探测概率和虚警概率。第 4 章介绍的是目标和背景光学特性,这样才能有效地探测目标。第 5 章是激光雷达系统的核心部分——发射机和接收机。而光学天线,信号处理已另有较多的书籍介绍,本书就不重复。激光雷达虽然种类和应用繁多,但不外乎是非相干的和相干的两大类。因此,第 6 章特别介绍了非相干激光雷达和相干激光雷达两种激光雷达系统。

本书是作者和他的同事及学生,国内科研协作单位的朋友共同劳动的结晶。1987 年以来,美国、德国、英国和日本的同行和朋友们都热心介绍他们自己的工作,解释疑难,接收派出学者和研究生。因此,作者才可能获得比较新的资料和论文,在此,对国内外的朋友表示衷心感谢。

近 20 年来,国防科工委、总装备部和航天工业部(总公司)对我校的激光雷达课题一直予以支持和关心。作者同样也不能忘记课题组的师生,特别是刘兆岩博士、孙东松博士、蔡喜平博士后以及牛玉清博士后等在工作上的支持和生活上的帮助。对此,一并

表示特别诚挚的感谢。

由于时间匆忙,本人学识有限,书中定有不当和谬误之处,敬请广大读者指出,以便修正。

作者于哈尔滨工业大学

2001年元月

目 录

第 1 章 激光雷达的理论基础	1
1.1 概述	1
1.1.1 发展简史	1
1.1.2 概念	3
1.2 激光雷达作用距离方程	6
1.2.1 激光雷达作用距离方程的标准形式	6
1.2.2 激光雷达作用距离方程的特殊形式	8
1.3 探测原理	11
1.3.1 基本概念	11
1.3.2 背景噪声 P_{BK}	12
1.3.3 信噪比表达式	14
1.3.4 噪声因子 NF	17
1.3.5 等效噪声功率	18
1.4 激光光束的性质	19
1.4.1 激光光束的形状	19
1.4.2 激光光束的束散角	20
1.4.3 激光光束的质量	22
1.4.4 激光的多路径效应	23
1.4.5 激光光束与搜索视场	24
1.4.6 搜索视场与图像质量	25
1.5 激光雷达优化原理	27
1.5.1 系统信噪比优化原理	27
1.5.2 系统效率优化原理	28
第 2 章 激光的大气传输特性	31

2.1	概述	31
2.2	大气的吸收性质	34
2.2.1	大气吸收的基本性质	34
2.2.2	能见度表示大气透射率	35
2.3	大气散射	39
2.3.1	瑞利散射	39
2.3.2	米氏散射和无选择性散射	42
2.3.3	确定大气散射的图解法	45
2.3.4	大气的总透射率	47
2.3.5	气象对激光传输的影响	48
2.4	大气湍流对激光传输的影响	63
2.4.1	闪烁效应	63
2.4.2	柯尔莫果洛夫(Kolmogorov)湍流模型	67
2.4.3	激光在湍流中的传输	69
2.4.4	湍流的其他影响	72
第3章	探测概率和虚警概率	73
3.1	概述	73
3.2	目标探测统计模型	74
3.2.1	目标的统计特性模型	74
3.2.2	目标统计模型的选择	76
3.3	相干接收激光雷达的模型	81
3.3.1	一般系统模型	81
3.3.2	激光雷达模型的大气湍流效应	85
3.4	非相干接收激光雷达的探测概率和虚警概率	89
3.4.1	基本规律	89
3.4.2	量子噪声限下的非相干接收激光雷达	92
3.4.3	热噪声限下的非相干接收激光雷达	93
3.5	光子噪声限下探测的统计数学	100
3.5.1	斯维林 II 模型	100
3.5.2	斯维林 IV 模型	101

3.5.3	斯维林 II 和斯维林 IV 模型比较	102
3.5.4	对数—标准化统计分布	105
3.5.5	赖斯(Rice)分布	106
3.5.6	光子计数激光雷达信号的统计特征	108
第 4 章	目标和背景的光学特性	112
4.1	概述	112
4.2	地球背景的光学特性	114
4.2.1	激光雷达下视探测的背景	114
4.2.2	激光雷达上视探测的背景	121
4.2.3	地球—大气系统的热辐射	124
4.2.4	海洋背景光学辐射特性	126
4.2.5	地物的辐射和反射特性	132
4.3	目标的激光散射特性	144
4.3.1	基本概念	145
4.3.2	目标的激光雷达截面(LRCS)的估算	149
第 5 章	激光雷达的发射机与接收机	159
5.1	概述	159
5.2	激光器	160
5.3	激光雷达的体制与激光调制	173
5.3.1	激光雷达的体制	173
5.3.2	激光调制	176
5.3.3	激光参量放大器	183
5.3.4	激光的发射准直和扫描	184
5.4	相干激光雷达的发射机	184
5.4.1	光栅选支技术	186
5.4.2	稳频技术	187
5.4.3	本振光功率	191
5.5	探测器	192
5.5.1	探测器的响应率	193
5.5.2	噪声等效功率	194

5.5.3	光子探测器的工作极限	199
5.6	激光雷达接收机	200
5.6.1	脉冲激光雷达	201
5.6.2	接收机制	205
5.6.3	信号处理分系统	212
5.7	相干激光雷达接收机的基本特征	219
5.7.1	混频效率	219
5.7.2	天线定理	220
5.7.3	混频定理	221
5.7.4	波前匹配	223
5.7.5	偏振控制	224
5.8	激光雷达发射机和接收机的设计原则	226
5.8.1	激光雷达整机的主要参数	226
5.8.2	相干接收系统主要电气参数	227
5.8.3	计算实例	227
5.8.4	激光雷达接收机性能评估	229
第6章	激光雷达系统	232
6.1	概述	232
6.1.1	激光雷达系统	232
6.1.2	激光雷达的发展趋势	234
6.2	激光测距雷达原理和组成	236
6.2.1	脉冲激光测距雷达	236
6.2.2	连续波激光测距雷达	238
6.2.3	激光测距雷达的性能	241
6.2.4	CO ₂ 脉冲激光测距雷达	244
6.2.5	微脉冲激光雷达	245
6.3	相干激光雷达	256
6.3.1	相干激光雷达对激光相干性的要求	256
6.3.2	相干激光雷达内光路的调准	257
6.3.3	角扫描速率	258

6.3.4	相干激光雷达接收机的有效孔径	259
6.3.5	光源的相干性	260
6.3.6	扫描谱线展宽	261
6.3.7	相干激光雷达实例	262
6.4	相干激光多普勒测速雷达	270
6.4.1	外差接收系统	270
6.4.2	多普勒信号处理技术	273
6.4.3	激光扫描测风场	274
6.4.4	长距离的相干脉冲多普勒测风激光雷达	277
6.4.5	尖峰效应测风激光雷达	281
参考文献		286

Contents

Chapter1 The Theory Basic for Lidar	1
1.1 Summarize	1
1.1.1 Developing Brief History	1
1.1.2 Concept	3
1.2 Range Equation for Lidar	6
1.2.1 Standard Form of the Range Equation for Lidar	6
1.2.2 Special Form of the Range Equation for Lidar	8
1.3 Detection Principle	11
1.3.1 Basic Concept	11
1.3.2 Background Noise	12
1.3.3 Expression for Signal-to-Noise Ratio	14
1.3.4 Noise Factor	17
1.3.5 The Equivalent Noise Power	18
1.4 Character of the Laser Beam	19
1.4.1 Beam Shape	19
1.4.2 Beam Angle of Divergence	20
1.4.3 Beam Quality	22
1.4.4 Effect of Multi-path	23
1.4.5 Laser Beam and Search Field	24
1.4.6 Search Field and Quality of Imaging	25
1.5 Optimize Principle for Lidar	27
1.5.1 Optimize Principle for Signal-to-Noise Ratio of System	27
1.5.2 Optimize Principle for Efficiency of System	28

Chapter 2 Character of Atmospheric Transmission	31
2.1 Summarize	31
2.2 Atmospheric Absorption	34
2.1.1 Basic Character of Atmospheric Absorption	34
2.2.2 Visibility Shown as Atmospheric Transmissivity	35
2.3 Atmospheric Scatter	39
2.3.1 Rayleigh Scatter	39
2.3.2 Mie Scatter and Non-selectivity Scatter	42
2.3.3 Diagram Method Confirming Atmospheric Scatter	45
2.3.4 Total Atmospheric Transitivity	47
2.3.5 Weather Effect on Laser Transmission	48
2.4 Atmospheric Turbulent Effect on Laser Propagation	63
2.4.1 Scintillation Effect	63
2.4.2 Kolmogorov Turbulent Model	67
2.4.3 Laser Propagation in Atmospheric Turbulent	69
2.4.4 Others Effects of the Turbulent	72
Chapter 3 Detection Probabilities and False Alarm Racs	73
3.1 Summarize	73
3.2 Target Detection Statistics Model	74
3.2.1 Target Statistics Model	74
3.2.2 Select for Target Statistics Model	76
3.3 Coherent Detection Laser Radar Models	81
3.3.1 Ordinary System Models	81
3.3.2 Atmospheric Turbulent Effect on Laser Radar Model	85
3.4 Detection Probabilities and False Alarm Racs for Incoherent Lidar	89
3.4.1 Basic Laws	89
3.4.2 Incoherent Lidar of Quantum Noise Limited-Receivers	92

3.4.3	Incoherent Lidar of Thermal Noise Limited-Receivers	93
3.5	Statistics Mathematical for Photon Noise Limited Detection	100
3.5.1	Swerling II	100
3.5.2	Swerling IV	101
3.5.3	Comparison of Swerling II and IV	102
3.5.4	The Log-Normal Distribution	105
3.5.5	The Rice Distribution	106
3.5.6	Lidar Signal Statistics in the Photon Count	108
Chapter 4	The Optic Capability for Target and Background	112
4.1	Summarize	112
4.2	Optic Capability for Background of the Earth	114
4.2.1	Downward Looking Detection Background on Lidar ...	114
4.2.2	Upward Looking Detection Background on Lidar	121
4.2.3	Thermal Radiation for Earth-Atmospheric System	124
4.2.4	Optical Radiation for Sea Background	126
4.2.5	Radiation and Reflect for Ground-Object	132
4.3	Scatter of the Laser for Target	144
4.3.1	Basic Concept	145
4.3.2	Estimate for LRCS of Target	149
Chapter 5	Transmitter and Receiver of the Lidar	159
5.1	Summarize	159
5.2	Laser	160
5.3	System of Lidar and Laser Modulation	173
5.3.1	System of Lidar	173
5.3.2	Laser Modulation	176
5.3.3	Laser Parametric Amplifier	183
5.3.4	Collimating and Scanning for Laser Transmit	184