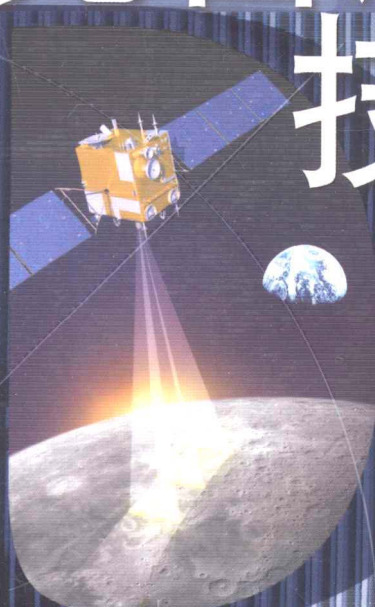


雷达技术丛书
<http://www.phei.com.cn>

“十一五”国家重点图书出版规划项目

激光雷达 技术 (上册)



戴永江 编著



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

有关此电子书的说明

本人可以帮助你找到你要的PDF电子书，计算机类，文学，艺术，设计，医学，理学，经济，金融等等。质量都很清晰，为方便读者阅读观看，每本100%都带可跳转的书签索引和目录，只要您提供给我书的相关信息，一般我都能找到，如果您有需求，请联系我 QQ1779903665。

PDF代找说明：

本人已经帮助了上万人找到了他们需要的PDF，其实网上有很多PDF,大家如果在网上不到的话，可以联系我QQ，大部分我都可以找到，而且每本100%带书签索引目录。因PDF电子书都有版权，请不要随意传播，如果您有经济购买能力，请尽量购买正版。

提供各种书籍的pd电子版代找服务，如果你找不到自己想要的书的pdf电子版，我们可以帮您找到，如有需要，请联系 QQ 1779903665.

备用:QQ 461573687

声明：本人只提供代找服务，每本100%索引书签和目录，因寻找和后期制作pdf电子书有一定难度，仅收取代找费用。如因PDF产生的版权纠纷，与本人无关，我们仅仅只是帮助你寻找到你要的pdf而已。

雷达技术丛书

- 《雷达目标特性》
- 《雷达环境与电波传播特性》
- 《雷达天线技术》
- 《雷达馈线技术》
- 《雷达发射机技术》
- 《雷达接收机技术》
- 《雷达信号处理和数据处理技术》
- 《雷达成像技术》
- 《雷达结构与工艺(上、下册)》
- 《监视雷达技术》
- 《相控阵雷达技术》
- 《机载雷达技术》
- 《制导雷达技术》
- 《精密跟踪测量雷达技术》
- 《超视距雷达技术》
- 《激光雷达技术(上、下册)》

策划编辑：刘宪兰



责任编辑：刘真平

责任美编：徐海燕



本书贴有激光防伪标志，凡没有防伪标志者，属盗版图书。

ISBN 978-7-121-12082-4



9 787121 120824 >

定价：130.00 元
(上、下册)

“十一五”国家重点图书出版规划项目
雷达技术丛书

激光雷达技术（上册）

戴永江 编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书较系统地介绍了与激光雷达有关的光电辐射源,探测器、大气和波导介质的传输特性,目标和背景环境的光学特性。

本书介绍激光雷达的基本原理与结构,阐述相关的辐射源、探测和传输的物理数学问题和关键技术,简介各种激光雷达在国防建设和国民经济各个部门中的应用。

本书从激光雷达的多功能化、小型化、全固态化和网络化的角度考虑问题,对系统技术和关键技术也进行了较详尽的介绍,力争能反映该领域的新成就和新动向。

本书可作为从事激光雷达研制、生产和应用的工程技术人员,气象学部门、环保部门和武器系统使用部门的专业人员的参考书,也可作为大学生、研究生的专业参考书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

激光雷达技术. 上册/戴永江编著. —北京:电子工业出版社,2010.11

(雷达技术丛书)

ISBN 978-7-121-12082-4

I. ①激… II. ①戴… III. ①激光雷达 IV. ①TN958.98

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 208102 号

策划编辑:刘宪兰

责任编辑:刘真平

印 刷:北京市天竺颖华印刷厂

装 订:三河市鑫金马印装有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本:720×1 000 1/16 印张:31.75 字数:560 千字

印 次:2010 年 11 月第 1 次印刷

印 数:4 000 册 定价:130.00 元(上、下册)

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010) 88258888。

出版说明

“雷达技术丛书”是由中国工程院王小谟院士和张光义院士倡导并担任主编、中国电子科技集团公司负责组织、电子工业出版社负责出版的一套大型设计性系列丛书。这套“雷达技术丛书”（以下简称“丛书”）共16册，是我国雷达界多个单位的知名专家学者集体智慧的结晶，是他们长期实践经验的总结，是一套理论与实践相结合的佳作。

这套“丛书”的内容十分丰富，概括地说包括了三个主要方面的内容：一是介绍了影响雷达性能的目标特性和环境特性，包括目标（含隐身目标）的频率特性、散射特性、极化特性和起伏特性，地杂波、海杂波和气象杂波特性，噪声与干扰特性，大气与电离层传播特性等；二是介绍了雷达各分系统的设计，包括面天线与阵列天线、微波网络与微波传输线、固态与电子管发射机、频率源与模数接收机、信号处理与数据处理的基本原理、技术指标、设计方法和性能测试，还介绍了雷达系统与分系统的结构设计制造工艺，包括微组装与柔性制造工艺，可靠性、可维性、环境适应性设计及传动、架拆与运输规范的设计等；三是介绍了典型雷达系统的设计，包括各种二坐标与三坐标防空雷达、有源与无源相控阵雷达、机载预警与火控雷达、多普勒与相控阵制导雷达、脉冲与连续波精密跟踪测量雷达、合成孔径与逆合成孔径成像雷达、天波与地波超视距雷达等的基本原理、技术体制、战技性能、设计方法和联试与试飞等。

这套“丛书”的定义准确，原理清晰，语言简练，图文并茂，公式齐全，数据丰富，集设计性、实用性、新颖性于一体，是雷达科技工作者的设计指南，是雷达部队培训的良好教材，是高校电子工程专业及相关专业师生不可多得的教材和参考书。

“雷达技术丛书”编辑委员会编辑部

2004年12月29日



序

雷达在第二次世界大战中得到迅速发展，为适应战争需要，交战各方研制出从米波到微波的各种雷达装备。战后美国麻省理工学院辐射实验室集合各方面的专家，总结二战期间的经验，于 1950 年前后出版了雷达丛书共 28 本，大幅度推动了雷达技术的发展。我刚参加工作时，就从这套书中得益不少。随着雷达技术的进步，28 本书的内容已趋陈旧。20 世纪后期，美国 Skolnik 编写了雷达手册，其版本和内容不断更新，在雷达界有着较大的影响，但它仍不及麻省理工学院辐射实验室众多专家撰写的 28 本书的内容详尽。

我国的雷达事业，经过几代人 40 余年的努力，从无到有，从小到大，从弱到强，许多领域的技术已经进入了国际先进行列。总结这些成果，为我国今后的雷达事业发展做点贡献是我长期以来的心愿，在出版社的鼓励下，我和张光义院士倡导并担任主编，由中国电子科技集团公司负责组织编写了这套“雷达技术丛书”（以下简称“丛书”）。它是我国众多专家、学者长期从事雷达科研的经验总结，具有较好的系统性、新颖性和实用性。

雷达技术发展之快，使得传统的雷达观念、体系结构不断更新，在 20 世纪 50 年代的接收、发射、天线、显示典型的分机基础上，又发展到现在的雷达数据处理和信号处理分系统。本“丛书”就是按此体系进行了分册。随着微电子技术的发展，数字化还在不断前移，天线收发已经并继续不断引入了数字处理内容，信号和数据处理的界限越来越模糊，雷达体系正从流程型向网络型转变，由于目前其技术都尚未成熟，本“丛书”只在现有的体系中把这些新的内容进行了分别叙述。

“丛书”内容共分 3 个部分 16 分册：第一部分主要介绍雷达的目标特性和环境，第二部分介绍了雷达各组成部分的原理和设计，第三部分按典型应用雷达系统的分类对各雷达系统作了深入浅出的介绍。“丛书”各册著者不同，写作风格各异，但其内容的科学性和完整性是不容置疑的，通过对各分册结构和内容的审定，使各分册之间既具有较好的衔接性，又保持了各分册的独立性，读者可按需

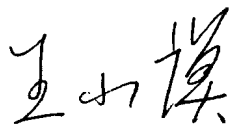
要读取其中一册或数册。希望此次出版的“丛书”能对从事雷达设计、制造的工程技术人员，雷达部队的干部、战士和高校电子工程专业及相关专业的师生有所帮助。

“丛书”是从事雷达技术领域各项工作专家们集体智慧的结晶，是他们长期工作成果的总结与展示，专家们既要完成繁重的科研任务，又要在百忙中抽出时间保质保量地完成书稿，工作十分辛苦，在此，我谨代表“丛书”编委会向各分册作者和审稿专家表示深深的敬意！

“丛书”的出版，得到了中国电子科技集团公司、电子科学研究院、南京电子技术研究所、华东电子工程研究所等各参与单位领导的大力支持，得到了电子工业出版社领导和参与编辑们的积极推动，得到了“丛书”编辑部各同志的热情帮助，借此机会，一并表示衷心的感谢！

中国工程院院士

中国电子科技集团公司科技委副主任

A handwritten signature in black ink, appearing to read '王小华' (Wang Xiaohu), written in a cursive style.

2007年10月

前 言

激光雷达技术涉及激光辐射的基本物理规律、光电测量、辐射的发射、传输、目标特性、检测、信息处理、显示和传输、系统整机工程（含建模及仿真、随动控制、电源及组网）和制造等环节。近年来，实行军民结合，寓军于民的发展策略，开拓了更广泛的应用领域和市场前景，发展成为国防和社会信息化建设的重要组成部分。

60 年来，我国的激光雷达和其他事业一样，取得了一定进展和可喜的成果。但是和世界先进水平仍有一定的差距，有些差距甚至相当大。我们还没有像美国麻省理工学院（MIT）的林肯实验室那样高水平的，能主导美国激光雷达等光电技术发展主流的研究中心；没有建立起落户在各个航天中心的激光雷达工程研制及应用的实验室体系、精密的测试和定标系统；没有形成完备的激光雷达相互配套、分工明确的产业链体系。更重要的是在观念、创新能力和掌握核心技术上的差距。要达到世界先进水平，就要求把握激光雷达的未来发展特点，必须勇于进行改革和创新。这些特点是：

1. 探测的对象已扩展到外层空间和宇宙、生命科学和分子及原子范围。基础理论、技术科学和工程融合的趋势日益明显。人类在大胆利用激光雷达探索宇宙空间、海洋和地球深部。

2. 激光雷达的发展使得在自由空间，对目标信息获取、传输和控制，受激辐射和自发辐射的辐射源的激光雷达，被动和主动接收式的激光雷达，军事和民用的激光雷达等四方面的内在联系越来越密切。

3. 人类所获得的目标信息 75%来自图像，一幅图像给出的信息、遐想和知识就远远超过文字叙述的内容。想必读者看到本书提供的一些图像，便自有体会。三维图像信息获取和分析日益重要。图像信息内容不仅包括位置、速度、方位、姿态等，而且包括几何形状、表面特性、内部结构、运动和特征量的变化以及生命信息等。三维成像激光雷达逐渐成为发展的主流。

4. 激光雷达的信息获取多元化、精细化；信息处理和传输的数字化、多传感器的信息融合和网络化；信息控制的高速化、智能化；探测、通信和控制的一体化的特征日益明显。

5. 器件技术、单元技术和系统技术之间，硬件技术和软件技术之间互相渗透、互相结合日益密切，由以分立元件为主，发展为采用矩阵激光辐射源、微光学阵列器件、大规模凝视焦平面阵列探测器和高速微电子处理器相结合的激光雷达。

6. 纳米级微尺度的小型化研究、加工和应用成为可能, 微机械、微电子和微光子加工工艺逐渐成为研制、生产和应用激光雷达的主流。激光雷达的“五化”——多功能化、微型化、集成化、网络化和智能化成为现实。

7. 激光雷达及相关技术的应用领域不仅以军用为主, 而且在线生产、医学和生命科学等领域得到越来越广泛的应用, 产生的经济效益也是可观的。激光雷达作为光电雷达传感器重要组成的新兴战略性产业的特征日益明显。激光雷达不仅是卫国利器之一, 也是国家发达致富、民族繁荣昌盛、人民幸福安康的重要工具。

8. 采用节能、洁净的燃料电池供电的数字化激光雷达等传感器已成为传感器网络和信息网络的关键技术和信息社会的“发动机”、“助推器”, 拉动了微电子、微光子、光电子材料和器件、新型功能及其他相关材料和绿色智能激光雷达等传感器制造产业的发展。

世界正在经历一场罕见的金融危机, 它同时又孕育着新的科技革命。在科技创新方面抢占经济科技制高点, 就能掌握发展的主动权, 进入密集创新和产业振兴时代, 实现跨越式发展。既不能总跟踪模仿别人, 也不能单纯守业, 坐等技术转移, 必须依靠自己的力量, 特别重视基础研究和战略高技术研究, 拿出原创成果。

因此, 本书的内容和观点, 在《激光雷达原理》和《光电雷达原理》两书的基础上, 根据激光雷达技术、工程和应用发展的特点, 按照雷达技术丛书要求, 做了较大补充和改编, 以其共性基础知识为基础, 贯彻原理、技术、工艺和工程相结合, 军用和民用相结合的原则, 既介绍武器、工程应用, 也介绍工业和医学应用。在叙述上, 作者还企图尝试重点突出激光雷达, 力图解决激光与红外技术分割的状况, 使读者对主动式和被动式、相干式和非相干式的光电雷达有较完整的概念。在内容选取和编排上, 既适应高等学校教学和科研的需要, 也满足产业化和应用的工程技术人员、三军使用装备的指战员等的需要。

本书以激光雷达的系统工程为干线, 强调物理基础, 以分立式元器件为基础, 充实阵列探测技术, 介绍激光雷达的关键器件和技术, 也适当介绍激光雷达的其他配套技术、关联技术和知识。力图把握好骨干与分支、通俗与学术、普及与提高的关系, 力争能反映学术前沿成果及学科建设和基础理论研究现状。

本书共有 18 章。除了第 1 章的概论简介激光雷达的基本概念、发展历史、分类和应用外, 鉴于未来的激光雷达发展仍需要较强的物理基础知识, 第 2 章和第 3 章简单介绍一些物理概念、物理量和物理规律。第 4 章~第 12 章分别介绍与激光雷达有关的物理量的测量和定标; 激光雷达原理; 发射与接收技术; 辐射源; 探测器; 对激光雷达性能有重要影响的目标与背景辐射; 激光在大气及介质中的传输特性; 激光雷达探测目标时, 必需的搜索与跟踪技术; 在激光雷达研发和产业化中, 有重要作用的建模与仿真等关键技术和核心技术。第 13 章~第 17 章介

绍三种类型有代表性的基本的激光雷达系统技术；专门介绍成像激光雷达及其未来发展趋势；激光雷达系统设计的相关知识，并以测距跟踪激光雷达为例，介绍了设计流程；激光雷达在天、空、地、海方面的典型应用及其特点；最后，介绍激光雷达信息在自由空间的传输、多传感器网络及数据融合的概念。第 18 章介绍了激光雷达未来发展的趋势，以及应当注意的几个问题：激光雷达的光电对抗、激光雷达理论的发展、激光雷达与信息化、微型化战争和激光雷达产业化中的科学、技术和工程关系，人类、环境和经济等两个关系，发展激光雷达的保障条件等。其他的关键技术，如光学系统、扫描技术、调制解调和伺服控制等关键技术，就结合有关章节简单介绍了。人类大部分信息是从视觉图像获得的，由于本书涉及激光成像技术，引用的图像较多。为节约篇幅，许多知识就不能介绍了，还需要读者自行从图像中用心理会和获取有关知识。

几十年来，我的老师、同事、学生都曾在工作中给以支持，特别是已经故去的，令人尊敬的洪晶教授和马祖光院士的教诲，皮名嘉教授和南京达教授的指导和帮助，使我终身受益，令人难忘。我在德国宇航研究院（Deutsche Forschungs- und Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt, DFVLR/DLR）与费茨麦耶尔教授、雷曼博士的长期合作研究；与美国、德国、日本、英国等同行的学术交流和讨论，对本书的编写也是有帮助的。

本书涉及学科领域广泛，着重物理概念分析，数学体系较严密。对几种主要的激光雷达做了较详细的介绍。本书可作为大学生、研究生的专业参考书，以及工程和军队技术专业人员的参考书。

我国著名的雷达专家王小谟院士对编写给予了重要的指导，我国著名的雷达对抗专家张锡祥院士、中国航天电子技术研究院胡润卿研究员详细审阅了本书相关章节，提出了宝贵的修改意见，使作者受益匪浅。我的学生在科学研究、产业建设和生活中给以积极支持和关心。本书编写组在海外的博士、硕士和留学人员等对本书的编写，做了自己的工作。在此，对他们表示深深的感谢。

本书作为 16 本雷达技术丛书的最后一本，在有限的篇幅内，要概括光电辐射波段的有关主动式激光雷达的许多内容，纂写的难度可想而知。本人实属无名之辈，才疏学浅，蒙编委会青睐，胆战心惊受托执笔，时间紧迫，草草成书。书中定有许多谬论和错误，敬请各界读者指教，在此先表感激之情。

作 者

2010 年春节于哈尔滨工业大学

目 录

激光雷达技术(上册)

第 1 章 概论	(1)
1.1 引言	(2)
1.2 发展简史	(3)
1.2.1 理论基础和工程实践准备阶段	(4)
1.2.2 激光雷达的兴起和发展	(4)
1.2.3 激光雷达的发展趋势	(7)
1.3 激光雷达的特点	(9)
1.3.1 一般特点	(9)
1.3.2 新世纪激光雷达发展的特点	(11)
1.4 激光雷达的分类	(14)
1.5 激光雷达的应用	(16)
1.5.1 在国防建设中的应用	(16)
1.5.2 在国民经济和日常生活中的应用	(18)
1.6 激光雷达系统工程概念	(18)
参考文献	(20)
第 2 章 激光雷达基本物理知识	(21)
2.1 基本物理概念	(22)
2.1.1 波长和频率	(22)
2.1.2 基本物理量	(22)
2.1.3 光谱物理量	(25)
2.1.4 光子物理量	(26)
2.1.5 光学量	(27)
2.1.6 辐射和物质相互作用的基本物理量	(28)
2.2 基本物理定律	(30)

2.2.1 理想黑体与基尔霍夫定律	(30)
2.2.2 朗伯余弦定律	(31)
2.2.3 斯蒂芬-玻耳兹曼定律	(32)
2.2.4 维恩位移定律	(33)
2.2.5 瑞利-金斯定律	(33)
2.2.6 普朗克辐射定律	(34)
2.2.7 爱因斯坦辐射公式和系数	(35)
2.3 定律推论	(36)
2.3.1 辐射源的光谱效率和工程最佳值	(36)
2.3.2 对比度	(37)
2.3.3 空间频谱特性	(38)
2.4 实际辐射体	(40)
2.4.1 辐射功率特性	(40)
2.4.2 影响发射率的因素	(41)
参考文献	(46)
第3章 光度学和辐射度学基础	(47)
3.1 基本概念	(48)
3.1.1 立体角	(48)
3.1.2 辐射度学量	(49)
3.1.3 光度学量	(51)
3.1.4 辐射度量和光度量的关系	(53)
3.2 基本度量原理	(58)
3.2.1 反平方定律	(58)
3.2.2 叠加原理	(59)
3.2.3 互易定理	(59)
3.2.4 立体角投影定理	(59)
3.3 辐射量的计算	(60)
3.3.1 朗伯余弦体	(60)
3.3.2 圆盘	(62)
3.3.3 球面	(62)
3.3.4 半球面	(62)

3.3.5	点源	(63)
3.3.6	小面源	(63)
3.3.7	扩展源	(63)
3.3.8	线状源	(65)
3.4	黑体辐射的简易计算	(66)
3.4.1	黑体辐射函数表	(66)
3.4.2	黑体辐射计算的近似公式	(67)
3.4.3	黑体辐射图表计算方法	(67)
	参考文献	(68)
第 4 章	光电测量技术	(69)
4.1	光电测量基本概念和原理	(70)
4.1.1	标准测量的重要性	(70)
4.1.2	辐射度标准基本测量方法	(72)
4.1.3	辐射度测量的标准辐射源	(73)
4.1.4	辐射测量的基本问题	(75)
4.2	光度学测量	(77)
4.2.1	基本概念和重要性	(77)
4.2.2	光照度标准	(78)
4.2.3	光度导轨	(79)
4.2.4	发光强度测量	(80)
4.2.5	光通量测量	(84)
4.2.6	亮度的测量	(94)
4.2.7	单色仪	(97)
4.3	光谱学测量	(106)
4.3.1	光谱仪结构和原理	(106)
4.3.2	傅里叶变换基本原理	(108)
4.3.3	仪器特点	(109)
4.3.4	用途	(110)
4.4	色度学基本规律	(111)
4.4.1	色度学与成像探测技术	(111)
4.4.2	颜色测量	(112)

4.4.3	人眼的颜色效应	(114)
4.4.4	色调、饱和度和明度	(115)
4.4.5	三原色原理	(116)
4.4.6	色品图	(117)
4.4.7	色温、照度与人体感受的舒适度	(119)
4.5	色度学的测量	(120)
4.5.1	色度学测量的作用与基本概念	(120)
4.5.2	分光测色仪——红外分光光度计	(121)
4.5.3	色度计	(124)
4.6	光电测量技术	(126)
4.6.1	基本概念	(126)
4.6.2	基本特点	(126)
4.6.3	测量的法律法规	(127)
4.6.4	基本测量要素和原则	(128)
4.6.5	测量误差	(130)
4.6.6	测量结果的评价	(132)
4.6.7	数据处理	(136)
4.6.8	测量结果与定标	(139)
4.7	激光参数测量	(142)
4.7.1	激光的基本特性参数测量	(142)
4.7.2	激光空域特性参数测量	(145)
4.7.3	激光时域特性参数测量	(148)
4.7.4	半导体激光器参数测量	(149)
4.8	光电探测器参数测量	(151)
4.8.1	光电探测器基本特性参数测量	(151)
4.8.2	半导体光电探测器参数测量	(155)
4.9	光探测和光通信参数测量	(155)
4.9.1	辐射度和色度计量标准	(155)
4.9.2	激光接收系统计量标准	(156)
4.9.3	激光发射系统计量标准	(157)
4.9.4	光电综合测量系统	(157)

4.9.5 光学传递函数	(159)
4.10 光电测量系统的性能	(161)
4.10.1 测量系统静态特性	(161)
4.10.2 测量系统动态特性	(163)
4.10.3 现代光电测量技术的发展	(167)
参考文献	(170)
第5章 激光雷达探测原理	(173)
5.1 激光雷达基本概念	(174)
5.1.1 激光雷达的基本组成及功能	(174)
5.1.2 主要战术参数	(176)
5.1.3 主要技术参数	(178)
5.2 激光雷达作用距离方程	(179)
5.2.1 标准形式	(179)
5.2.2 特殊形式	(180)
5.3 探测概率和虚警概率	(183)
5.3.1 引言	(183)
5.3.2 目标探测统计模型	(184)
5.3.3 非相干激光雷达模型	(189)
5.3.4 相干激光雷达模型	(191)
5.4 激光雷达的性能参数	(192)
5.4.1 基本概念	(192)
5.4.2 背景噪声	(193)
5.4.3 信噪比	(194)
5.4.4 噪声因子	(196)
5.4.5 等效噪声功率	(197)
5.5 多路径效应和搜索视场	(197)
5.5.1 多路径效应	(197)
5.5.2 搜索视场	(198)
5.6 激光雷达优化原理	(200)
5.6.1 系统信噪比优化原理	(201)
5.6.2 系统效率优化原理	(202)

参考文献	(204)
第 6 章 激光雷达发射与接收技术	(207)
6.1 发射和接收技术概述	(208)
6.2 激光雷达发射系统	(209)
6.2.1 激光发射系统的一般结构	(209)
6.2.2 激光发射波形	(210)
6.2.3 激光调制	(211)
6.2.4 激光放大	(215)
6.2.5 激光准直和扫描	(215)
6.3 相干激光雷达发射机	(216)
6.3.1 光栅选支技术	(217)
6.3.2 稳频技术	(218)
6.3.3 本振光功率控制技术	(219)
6.4 激光雷达接收技术基本要求	(221)
6.4.1 基本要求	(221)
6.4.2 激光直接接收	(222)
6.4.3 激光外差接收	(223)
6.4.4 对探测器的基本要求	(224)
6.4.5 对信号处理的基本要求	(225)
6.5 激光雷达接收机	(229)
6.5.1 脉冲接收	(229)
6.5.2 连续波接收	(233)
6.5.3 接收机解调	(235)
6.6 相干激光雷达接收机	(238)
6.6.1 混频定理与混频效率	(238)
6.6.2 天线定理	(240)
6.6.3 波前匹配	(241)
6.6.4 偏振控制	(242)
6.7 激光雷达的发射接收机设计原则	(242)
6.7.1 体制的选择原则	(242)
6.7.2 系统整机的主要参数	(244)

6.7.3 相干激光雷达接收系统主要参数	(245)
6.7.4 相干激光雷达接收系统计算基本公式	(245)
6.7.5 接收机性能评估	(247)
参考文献	(248)
第7章 激光雷达的辐射源	(251)
7.1 标准黑体辐射源	(252)
7.1.1 黑体辐射计算近似公式和图表计算方法	(253)
7.1.2 辐射源的光谱效率和工程最佳值	(253)
7.1.3 辐射对比度	(254)
7.1.4 辐射体的功率特性	(255)
7.1.5 影响辐射体发射率的因素	(256)
7.1.6 实际黑体辐射源	(257)
7.1.7 黑体辐射源的定标	(258)
7.1.8 其他标准辐射源	(259)
7.2 激光辐射源	(260)
7.2.1 激光辐射基本原理	(260)
7.2.2 激光的特点	(263)
7.2.3 激光光束特性	(263)
7.2.4 激光器参数的测试与定标	(264)
7.2.5 气体激光器	(265)
7.2.6 固体激光器	(269)
7.2.7 激光二极管	(270)
7.2.8 新型激光二极管	(277)
7.2.9 二极管泵浦固体激光器	(286)
7.2.10 光纤激光器	(291)
7.2.11 激光辐射源单元模块集成组件	(296)
7.3 阵列激光辐射源	(299)
7.3.1 微透镜阵列和微光栅阵列	(299)
7.3.2 阵列激光二极管	(302)
参考文献	(310)

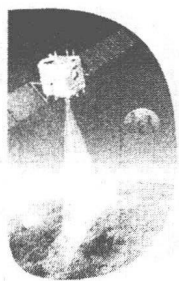
第 8 章 激光雷达的探测器	(313)
8.1 探测器的分类和发展简史	(314)
8.1.1 探测器的分类谱系	(314)
8.1.2 发展简史	(317)
8.2 特性参数	(318)
8.2.1 响应率(响应度)	(319)
8.2.2 信噪比	(321)
8.2.3 探测率或归一化探测率(探测度)	(323)
8.2.4 其他参数	(324)
8.2.5 探测器的极限性能	(325)
8.3 光子探测器	(327)
8.3.1 光子探测器的物理效应	(327)
8.3.2 内光电效应探测器	(330)
8.3.3 光电二极管	(334)
8.3.4 PIN 型硅光电二极管	(341)
8.3.5 雪崩光电二极管	(343)
8.3.6 四象限光电二极管	(349)
8.3.7 光电位置敏感器	(350)
8.3.8 肖特基势垒二极管	(351)
8.3.9 异质结光电二极管	(353)
8.3.10 其他光子探测器	(354)
8.4 光纤探测器	(355)
8.5 固态阵列探测器	(357)
8.5.1 阵列探测器的关键技术	(358)
8.5.2 MOS 结构	(360)
8.5.3 微电子机械系统技术	(363)
8.5.4 焦平面阵列技术	(365)
8.5.5 电荷耦合器件	(367)
参考文献	(378)
第 9 章 背景与目标光学特性	(381)
9.1 研究对象与意义	(382)

9.2 地球背景的光学特性	(383)
9.2.1 激光雷达下视探测的背景	(383)
9.2.2 激光雷达上视探测的背景	(387)
9.2.3 地球-大气系统的热辐射	(392)
9.2.4 水面的辐射和反射	(394)
9.2.5 地表特征物的辐射和反射	(399)
9.3 目标光学特性	(405)
9.3.1 概述	(405)
9.3.2 基本概念	(406)
9.3.3 各类目标的激光雷达截面	(413)
9.3.4 有动力飞行器	(416)
9.3.5 地面车辆	(421)
9.3.6 水面舰艇	(422)
9.4 生命体的红外辐射	(423)
参考文献	(424)
第 10 章 激光的大气传输特性	(425)
10.1 意义和主要研究内容	(426)
10.2 大气的空间组成	(428)
10.2.1 地球大气组成层次	(428)
10.2.2 大气模式	(429)
10.2.3 辐射的大气传输方程	(432)
10.2.4 大气窗口	(433)
10.3 大气辐射的物理现象	(434)
10.3.1 大气对辐射和激光的反射	(434)
10.3.2 大气对辐射和激光的折射	(434)
10.3.3 大气对辐射和激光的衍射	(435)
10.3.4 其他大气光学现象	(435)
10.4 大气对辐射和激光的吸收	(435)
10.4.1 大气吸收现象	(435)
10.4.2 大气吸收的研究方法	(437)
10.5 大气对激光的散射	(444)

10.5.1	大气散射现象	(444)
10.5.2	散射的物理模型	(446)
10.5.3	确定大气散射系数的实用方法	(453)
10.5.4	气溶胶粒子散射的衰减	(456)
10.5.5	气溶胶与电磁辐射和光辐射的相互作用	(457)
10.5.6	吸收和散射对大气衰减的联合效应	(458)
10.5.7	LOWTRAN(LOWresolution TRANsmision)法	(461)
10.6	大气湍流效应	(464)
10.6.1	大气湍流效应简介	(464)
10.6.2	湍流对大气的折射率影响	(465)
10.6.3	强度闪烁	(467)
10.6.4	光束扩展	(472)
10.6.5	源像抖动	(473)
10.6.6	光束漂移	(473)
10.6.7	湍流的其他影响	(474)
10.7	气象对激光传输的影响	(477)
	参考文献	(486)

第 1 章

概 论



1.1 引言

“雷达”一词是按 IEEE 686—2008 标准的英文 Radar 的中文音译而来的。该标准认为“雷达是以电磁波对目标,进行包含搜索和跟踪在内的探测、定位(距离和角位置)的传感器。”“可分为本身带辐射源的有源雷达(含半有源雷达)和不带辐射源的无源雷达。”

光波也属于电磁波,能完成以上定义工作的各种波段的探测和成像等传感器,当然也属于雷达的范畴。20 世纪 60 年代相干性好的激光的出现,使利用电磁波的雷达扩展到从紫外到远红外波段的激光辐射。1987 年西方七国制定的《导弹技术控制法》(Missile Technology Control Regime, MTCR)认为“激光雷达系统将激光用于回波测距、定向,并通过位置、径向速度及物体反射特性识别目标,体现了特殊的发射、扫描、接收和信号处理技术。”

此二定义既给出了激光雷达的定义,又指出在激光辐射波段可分为本身带有激光辐射源的有源激光雷达(含发射和接收分置的半有源激光雷达)和自身不带激光辐射源的无源激光雷达。有源和无源激光雷达接收技术的共有技术较多,服从的物理规律基本相同。

其次,又指出激光雷达系统按对目标空间位置和角位置、速度和目标自身反射特性系列分类。因此,本书的激光雷达系统的体系按测距测角激光雷达、测速激光雷达和反映目标反射特性,以识别目标为主要目的的成像激光雷达分类。同时,测量目标有宏观物体和分子、原子等微粒团。因此,也将能测量宏观物体和微粒团的微脉冲激光雷达归纳为激光雷达系统系列中的重要部分。此二定义符合从物质世界的时空观,从宏观到微观认识物质世界的科学观点。

再次,它将激光雷达系统限定为四项技术,因此本书主要考虑这四个方面,对随动控制和信息传输两方面技术,就不列入本书范围,只是简单介绍它们之间的联系和今后融合的趋势。

各种雷达和光电频谱密切联系,图 1.1 所示是太阳光谱和微波频段图。光波的波长单位为纳米 (nm)、微米 (μm)、毫米 (mm)、厘米 (cm)、米 (m)。光电雷达的波段有可见光: $0.4\sim 0.75\mu\text{m}$, 红外或热辐射: $0.75\sim 1\,000\mu\text{m}$, 还可细分为近红外: $1\sim 3\mu\text{m}$, 中红外: $3\sim 5\mu\text{m}$, 远红外: $8\sim 14\mu\text{m}$ 。近来还延伸到紫外线、 γ 射线、X 射线。微波波段是电磁雷达的频段,以频率表示,单位为赫

兹 (1 赫兹=1 次/秒, $1\text{Hz}=1\text{s}^{-1}$)、千赫 (kHz)、兆赫 (MHz)、吉赫 (GHz) 和太赫 (THz)。对各频段及用途, 图中已清晰说明。

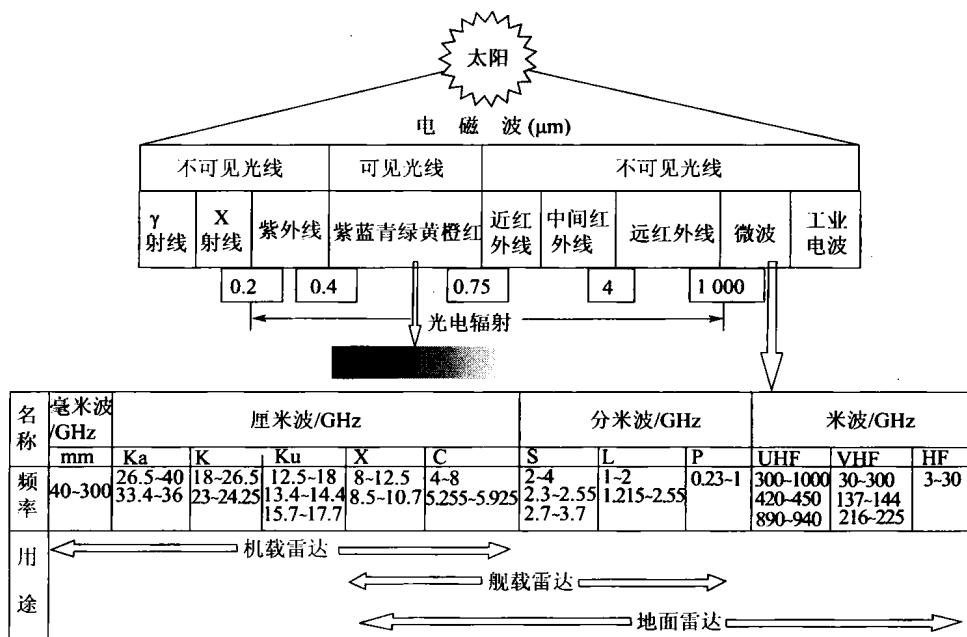


图 1.1 太阳光谱及微波频段图

任何物体只要有温度, 就能自发发射光电辐射, 温度越高, 波长越短。因此, 无源激光雷达的接收系统也能够探测物体自身发出的光电辐射, 对光电辐射的反射和散射。例如被动式辐射探测系统、热成像系统、电视摄像系统和 CCD 成像系统。

从光电辐射的观点来论述, 可以将它们统一称为光电雷达, 而将有源激光雷达通俗称为激光雷达。本书的“激光雷达”一词均指主动式接收有源激光雷达。本书以介绍有源激光雷达为主, 简单介绍半有源激光雷达和被动式探测系统的共性知识、技术和系统。

1.2 发展简史

激光雷达是 20 世纪 60 年代以后迅速发展起来的。在此前, 经历了近百年的理论探索和工程准备阶段, 才有最近 50 年的突飞猛进的发展。

1.2.1 理论基础和工程实践准备阶段

激光雷达大部分在红外辐射的波段，从 1800 年赫兹尔（W. Herschel）发现红外线或热辐射后至今，已经进入了第三个百年了。1886 年赫兹（H. Hertz）验证电磁波的发射、接收和目标特性等电磁雷达基本物理原理。19 世纪末，麦克斯韦经典电磁理论的建立，人们认识到热辐射、光和电磁辐射有相似性，也遵守折射、反射定律，但更易于被空气和其他介质吸收。还测量并发现黑体辐射总能量与温度、波长变化关系，辐射能量峰值随温度增高，向短波方向移动。建立了理想黑体模型，发现了辐射空间分布规律。

1905 年爱因斯坦发现和解释了光电效应；1916 年确定了电磁辐射和光电辐射的量子性，预言了受激辐射——激光的存在，以及广义相对论的时间、空间与辐射的关系，奠定了激光雷达的量子理论基础。

1937 年瓦特（R. W. Watt）研制成功第一台机载电磁雷达。1939 年，进入电磁雷达实用化，但功能单一、性能较低的发展阶段。第二次世界大战后才进入功能繁多、性能先进的成熟阶段。

1.2.2 激光雷达的兴起和发展

激光雷达是在光电辐射探测和电磁雷达的基础上发展起来的。前者奠定了激光雷达发射和接收技术的基础，后者则奠定了激光雷达整机技术的基础。

激光雷达的成功和发展得益于科学史上两个划时代的事件。

20 世纪 50 年代的半导体物理推动了探测器的发展。在红外波段有了性能优良的探测器，也促进了全光波段多元探测器的发展，并向非致冷、集成式、大面阵和微型化发展，提高了性能，降低了成本，体积、重量和功耗也都减小，同时也促进了计算机技术的出现和发展。

20 世纪 60 年代激光的出现，验证了爱因斯坦的预言。能量更集中的高强度、窄波束的激光，提高了探测灵敏度和作用距离。电磁雷达的相干性的外差接收体制的应用，进一步提高探测灵敏度。激光的方向性、准直性有利于精确瞄准和跟踪，提高了探测分辨率和控制精度。更高速率和信息量的激光通信和激光雷达一道发展起来。

近 50 年来，计算机和微电子技术促进了激光辐射源的小型化、高效化。出

现了电荷耦合器件、热释电阵列探测器、半导体发光二极管和激光二极管阵列光源；分立元件的探测系统发展为大规模凝视焦平面元件探测系统；探测器和数据处理芯片结合，既能探测，又能进行信号处理和成像，探测灵敏度、图像分辨率有较大提高。

1961 年激光器出现不久，主动式的激光测距仪便诞生了。同时， CO_2 相干激光雷达也在发展。20 世纪 80、90 年代，陆续出现微脉冲激光雷达（Micro Pulse Lidar, MPL）、差分吸收激光雷达（Differential Absorption Lidar, DIAL）、喇曼散射激光雷达（Raman Scatters Lidar, RSL）、多普勒激光雷达和生物激光探测仪等。

近年来，研制了频率和功率稳定性更好，宽频带可调谐，寿命更长和效率更高的大功率激光器；开发了光参量振荡技术（Optical Parameter Oscillato, OPO）和频率捷变材料（Frequency Agile Material, FAM）；发展了连续波、Q 开关和超短脉冲等波形控制技术和激光主动稳频技术；研制了更好的激光发射的波形控制和光束扫描方法；研制了高灵敏度、快速响应的单元和阵列光电探测器；研制了双基站或多基站，多模式整机系统，与其他模式传感器合成或集成的多模复合激光雷达；发展了激光雷达的快速信号处理、系统优化设计和建模与仿真技术。

在“软件”方面，建立了各种数据库、多模传感器数据融合技术；发展了对人眼安全的高重复频率和低能量短脉冲激光技术，可在低功率下获得较远作用距离和较高分辨率；获得更多信息量，具有成像能力。在集成化、多功能化、小型化和可靠性方面取得进展。

表 1.1 表示各代激光雷达的粗略特点，并指出正在发展的第四代激光雷达的特点。半个世纪以来，从激光雷达的理论基础、收发技术、信息处理和显示、探测对象、探测模式、体积和重量、运载平台和建模与仿真技术等方面的发展等特征综合分析，激光雷达已发展了三代半。第一代主要是地基的气体 and 固体激光器激光发射和单元探测器接收的激光雷达；第二代激光雷达进一步提高气体和固体激光器性能，出现了半导体二极管激光器辐射源和高性能探测器，单元器件发展为单元模块式组件，使之满足车载、机载和部分星载要求；第三代激光雷达以半导体激光器泵浦的固体激光器的辐射源和阵列探测器为主，光电探测和信息处理的集成化程度大大提高，在模块式组件的基础上，进一步形成微型化的功能部件，完全满足星载和弹载的要求。目前的三代半是以纳米级集成光学的微光学系统技术为特征的激光雷达，它以激光器、探测器和光学系统的阵列化，信号探测、处理和传输的数字化及

系统级芯片化为主要特征，探测对象由传统的军事硬目标，转变为以分子、原子和生命体为对象的软目标，极大地扩展了在民用领域的应用，展示了广阔的商业化前景。激光雷达的研发、设计和生产的建模与仿真形成了较完备的商业性体系。许多特性接近物理极限，出现了许多新的理论和实际问题。

表 1.1 各代激光雷达的特点

分代	理论基础	发射系统	接收系统	信息处理	运载平台	体积、重量	探测对象	建模仿真	工作模式
第一代	经典理论	气体激光，传统光学系统	单元探测器，脉冲体制，直接接收	单元电路，模拟电路	地基为主，车载为辅	分立元件，大	硬目标	很少用	单一波长，单一模式
第二代	量子理论	气体/固体/半导体激光，光机扫描	SPITE 器件，线列探测器，外差接收	单元电路，数字电路，成像显示	车/机载为主，星载为辅	分立元件，单元模块，中等	硬目标	个别单元	双色、多光谱，主被动复合
第三代	光子探测，统计理论	DPSS 发射，电子扫描，非扫描	面阵探测器，外差接收	集成模块，DSP 芯片，成像显示	车/机载，弹/星载	功能部件，MOEMS，小	硬目标，软体取样	单元模块，功能部件，分系统	多波长复合，多功能模块，智能化模块
第四代	光子探测，纳米物理	阵列发射，微光学系统	微光学系统，焦平面阵列探测器，光纤导光	硬软件融合，系统级芯片，高分辨率，成像显示	植入生物体	系统级芯片，极小	硬目标，软体取样	系统总体，产业决策，产业管理	全波段复合，光电全模复合，测通控一体化，多模复合模块

图 1.2 所示是三代激光雷达的图片，第一代以美国麻省理工学院（Massachusetts Institute of Technology, MIT）的林肯实验室（Lincoln Laboratory, Lincoln Lab 或 Lin. Lab.）的地面火池（Firepond）CO₂ 相干激光雷达为代表，第二代以美国国家航天局（National Aeronautics and Space Administration, NASA）和美国国家海洋大气局（National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA）合作的车载 CO₂ 相干多普勒激光雷达为代表，第三代以 NASA 的几个航天中心研制的车载和弹载微脉冲激光雷达为代表。

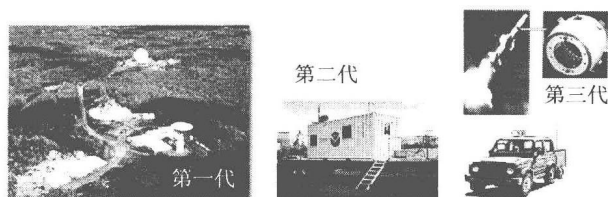


图 1.2 三代激光雷达的图片

1.2.3 激光雷达的发展趋势

进入 21 世纪以来,当人类步入信息化社会时,光电子信息技术两大支柱是光电信息的探测、检测和采集技术,光电信息的传输、通信和控制技术。激光雷达作为光电信息的探测、检测和采集技术的手段之一,是人类在激光照射和接收的空域范围内探测目标的重要手段,有着重要地位。

从这几代激光雷达的发展可以看到,激光雷达的发展趋势是“人控向自主,大型向微型,精细向复合”的方向发展。表现在以下几方面。

1. 成像化、多功能化、智能化、实时化

从激光雷达本身的性能看,目前,武器系统除了要求测距功能外,还应具有目标指示、目标特征分析、目标跟踪和测速、测量环境因素影响等功能。同时还要求具有一定的通信功能、控制功能,力求做到(探)测、通(信)、控(制)一体化。这就要求激光雷达的性能要多功能化、成像化、智能化和实时化。

目前有激光测距、激光测距与跟踪两类激光雷达。激光测距既可以精确测量目标距离,又可以为制导武器精确指示目标。实现这种功能有两种方法:一种是发射单脉冲输出的脉冲能量应提高到 $100\mu\text{J}$ 以上,重复频率提高到 $4\sim 20\text{Hz}$,光束发散角减小到 $0.4\sim 0.1\text{mrad}$ 以下,并以编码的激光脉冲指示目标;另一种是配置某种组合件,为激光测距雷达配置四象限跟踪器,使之能同时测距和跟踪。如英国 Rapier Laser Fire 导弹激光发射系统中的激光自动跟踪测距仪,利用与激光测距雷达同轴的四象限跟踪器自动跟踪目标,激光测距雷达精确测量目标距离。

此外,还有将激光测距雷达与其他仪器组装在同一个壳体内完成多种功能的激光仪器,如美国 M-931 型激光测距夜视仪。它利用 GaAs 激光测距机和微光夜视仪组装成一个望远镜式的结构,可供昼夜观察和测距用。挪威 LP-100 型的激光测距雷达与微小型数字式弹道计算机组装在一个壳体内,除测距外,还可进行简单的弹道计算。

2. 集成化、标准化、微光学化、固体组件化

从激光雷达结构看,小型化和低成本是关系到激光雷达是否能普遍应用和大

量装备的重要问题。采用高效率、高光束质量的半导体二极管阵列激光器、半导体激光二极管泵浦固体激光器,体积小、重量轻、成本低和高质量的 Q 开关,高灵敏度的硅雪崩光电二极管探测器的光子计数模块,以及微光电子机械系统 (Micro Optical Electro Machine System, MOEMS) 技术的中、大规模集成化的固态阵列探测器和信息处理等标准化的组件,可以实现激光雷达部件集成化、标准化和组件化,从而使激光雷达整机系统实现小型化和低成本化。

20 世纪 90 年代,一批低成本的微型激光雷达相继研制成功。中程激光测距雷达的重量约在 3kg 以下,外形和大小像一副标准的军用双目望远镜,可手持使用,也可安装在带测角装置的三脚架,或装在战车、飞机、军舰上使用。美国 LRR-104 型微型近程激光测距雷达的重量为 510g,体积比一个香烟盒还小。它广泛用于坦克上,组装在坦克炮长或车长潜望式瞄准镜中,构成测瞄合一的模块结构。

小型化和固体化的激光器和探测器,后置处理电路组件的发展,其难点是固体激光谐振腔组件化。它利用光学黏结剂或用升华的方法,在 YAG 棒的一端面镀上介质反射膜作为输出反射镜,将棒的另一端面与片状染料 Q 开关和全反射镜黏结为一体。研制成由单平面镜-平面镜和平面镜-凹面镜组成的稳定谐振腔固体组件,或由平面镜-凸面镜组成的非稳定谐振腔固体组件。这种谐振腔使分立元件的谐振腔变成小型的盒式固体组件,减小了体积、重量,降低了成本。谐振腔元件预先校准固定,减小了替换谐振腔时校准和安装的复杂性。

在微光学技术基础上,激光雷达的光学收发系统、激光器和探测器实现高密度的面阵阵列,大量使用凝视焦平面面阵探测器。光学系统、信号处理等单元模块和功能部件,提高了激光雷达的性能,大大减小了体积和重量。

系统的设计从各种通用集成电路 IC (Integrated Circuit) 进行印制电路板 (Printed Circuit Board, PCB) 的板级设计和调试,转向以大规模现场可编程逻辑阵列 (Field Programmable Gate Array, FPGA) 或专用集成电路 (Application Specific Integrated Circuit, ASIC) 技术,发展系统级芯片,实现硬件和软件的融合,使得激光雷达系统在小型化方面有较大进展。

3. 网络化、天地一体化

由于激光雷达性能的多功能化、成像化和智能化,结构的集成化、标准化、固体组件化,特别是探测、通信和控制的一体化,信息的传输大量采用光通信,各种雷达平台实现网络化和天地一体化,使它成为信息化战争的指挥、作战和保

障的重要装备,是现代军用、民用信息化网络的重要组成部分。大到整个战略、战术网络,小到阵地武器系统的网络和单个大装备系统内部,都逐渐形成网络化。日常的交通监控、安保网络等都是典型的例子。

4. 分子级探测

探测的目标由硬目标的辐射、反射和多普勒效应,发展为微粒、分子和原子等组成的粒子团,激光的分子吸收,瑞利散射、米氏散射和喇曼散射,荧光效应和多普勒效应及边缘(Edge)效应等物理效应开始占主要地位,大大扩展了激光雷达的应用领域。

5. 对人眼安全,绿色环保和节能

目前普遍装备的 Nd:YAG 激光雷达的缺点是在烟雾中性能差;与 $8\sim 14\mu\text{m}$ 热成像夜视仪和其他波段的激光雷达的兼容性能差。激光雷达与微波雷达相比,虽然没有对环境的电磁污染,但是对人眼很不安全,在训练和在能见度差的战场环境中应用很不方便。新一代的激光雷达必须选择对人眼安全的激光波段,采取防止各种杂散光伤害人眼的措施。在具体的阵地武器网络和单个大装备系统内部网络都应有相应的措施,防止伤害自身和伤害友军,使之更加安全。采用节能、高效的半导体阵列激光二极管,以燃料电池和太阳能电池等清洁能源供电,使之成为真正的绿色环保和节能的激光雷达。

1.3 激光雷达的特点

1.3.1 一般特点

激光雷达是激光、大气光学、目标和环境特性、雷达、光机电一体化和计算机等技术相结合的产物。它的核心,一是激光发射系统,它发射发散角小,能量集中的激光光束;另一个是激光接收系统,它探测和接收照射到目标上的反射、散射等回波信号。

激光雷达的基本技术源自微波雷达,二者并无本质区别,原理框图也十分类似,如图 1.3 所示。传统雷达是以微波和毫米波为载波的雷达。激光雷达以激光作为载波,波长比微波和毫米波短得多。

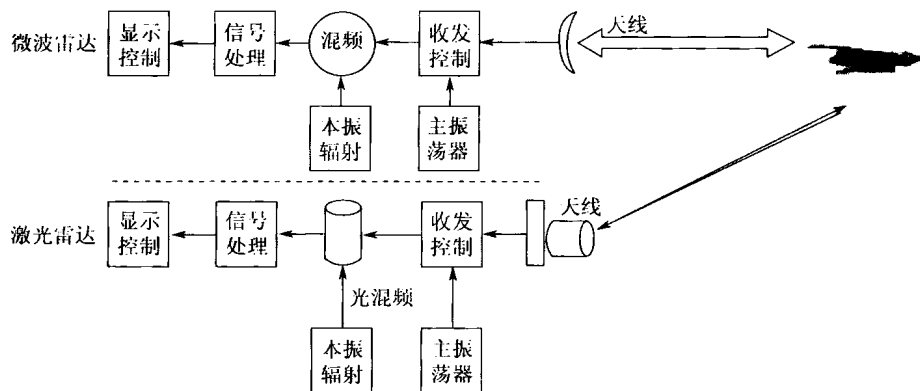


图 1.3 激光雷达和微波雷达探测原理的比较

与微波雷达相比，激光的波长比微波短好几个数量级，又有更窄的波束，它的优点是：

(1) 探测灵敏度和测量分辨率（角分辨力、速度分辨力和距离分辨力）高，多普勒频移大，信息量大，可获得幅度、频率和相位信息，可测速及识别动目标。经过信号处理具有成像能力，可得到运动目标的高分辨率清晰图像。

(2) 激光雷达的波长短，可在分子量级上对目标进行探测。这是微波雷达无能为力的。利用不同的分子对特定波长的激光吸收、散射或荧光特性，可以在分子量级上探测不同的物质成分。在低功率下获得较远的作用距离和较高的分辨率，低能量的短脉冲激光对人眼安全，高重复频率脉冲可以获得更多的信息量。

(3) 能全天候工作，不受白天和黑夜光照的限制；受气象和地面背景、天空背景干扰小；抗干扰能力强，隐蔽性好；激光不受无线电波干扰，能穿透等离子鞘，低仰角工作时，对地面多路径效应不敏感；激光束很窄（ 10^{-3} rad 数量级），只有在被照射的那点，那一瞬间，才能被接收，故被截获概率很低。

(4) 在功能相同的情况下，较微波雷达体积小、重量轻；天线和系统的结构尺寸可做得很小；近年来，由于微电子和微光学技术的发展，在功能相同的情况下，激光雷达的全固态集成光学化和小型化，硬件和软件的融合等，取得较大进展。这是目前微波雷达难以做到的。

(5) 激光雷达和激光通信分别承担着探测和传输的不同任务，但它们的物理规律基本相同，波段同样宽广，重叠性和共用性好，技术和工程上也共用性强。因此，复合性好，探测通信一体化，网络融合化能力强。

与其他被动光电雷达相比, 激光雷达的优点是:

(1) 自身具有对目标的照射光源, 可全天候工作, 不受白天和黑夜的光照条件的限制。

(2) 激光的光束窄, 具有单色性, 谱线的线宽窄, 有更高的分辨率和灵敏度。有更强的抗干扰能力, 受气象及地面和天空背景的干扰小。

(3) 可获得幅度、频率和相位信息, 信息量大。可测速及动目标识别。

当然激光雷达也有缺点, 早期的激光雷达和微波雷达相比, 主要缺点有:

(1) 激光受大气及气象影响大。大气衰减和恶劣天气使作用距离降低, 大气湍流会降低激光雷达的测量精度。但激光雷达技术的发展, 通过计算机修正、自适应光学和相共轭光学技术等得到一定解决。作用距离短可以通过激光雷达实现小型化, 搭载运载平台解决。只要全固态激光雷达能探测 60~100km 的目标, 便可发挥它的体积小和重量轻的优势, 配合微型信号处理器、控制器, 可以搭载运动平台, 送到任何地方工作。目前, 已能发射星载激光雷达, 实现对深空间的探测。

(2) 激光的光束窄和单色性, 使其难以搜索和捕获目标。一般先由其他电磁雷达和光电雷达实施大空域、快速粗捕目标, 然后交由激光雷达再对目标进行精密跟踪测量。因此, 发展了多模复合式激光雷达, 提高了搜索、捕获和跟踪能力。被动光电雷达能探测任何遥远的, 具有温度的微弱光电辐射的物体, 激光雷达还不能取而代之。

(3) 激光功率曾经是探测距离受到限制的因素。研制大功率激光器, 除了从原理上寻找提高功率的措施外, 制造高密度、高亮度面阵的发光二极管和激光二极管, 发展单光子计数探测技术等, 也是解决的办法之一。

1.3.2 新世纪激光雷达发展的特点

(1) 激光雷达充分发挥了激光波长远低于传统电磁波的特点, 可以探测分子大小的微粒和生化物质。激光的分子散射(米氏散射、瑞利散射和喇曼散射等)、荧光效应等所涉及的信息也不再是位置、速度、方位、姿态等, 而是包括几何形状、表面特性、内部结构、运动等特征量的变化以及生命信息等。

(2) 激光雷达已成为信息化社会中信息获取、传输和控制的主要手段。信息获取向多元化、精细化发展; 信息传输向数字化、网络化发展, 光纤通信和自由空间光通信发展为三维立体数字通信网络; 信息控制高速化、智能化特征日益明

显, 成像技术与模式识别、微处理机技术相结合, 出现了具有自适应能力智能化的凝视型实时监控系统和“发射后不管”具有自主攻击能力的智能化武器系统、机器人和无人飞行器等。

(3) 军用和民用激光雷达之间, 和其他电磁及光电雷达的内在联系越来越密切, 共同特征越来越明显, 共有技术越来越多。被动式辐射探测系统为激光雷达接收系统提供技术支撑, 并支持了激光雷达对目标的搜索和跟踪; 激光雷达扩充了在精密测量、瞄准和跟踪技术的应用。二者的结合, 发展为综合性激光雷达, 大大提高了性能。利用激光雷达的相关技术进行非接触和非破坏性检查, 扩大了在现代工农业生产、医学和生命科学、海洋和宇宙开发等的应用, 产生可观的经济效益。激光雷达和各种光电雷达作为新兴战略性新兴产业, 正在发展。

(4) 激光雷达已经使基础科学、技术科学和应用工程日益融合为一体。元器件技术、单元模块技术、功能部件技术和系统整体技术、硬件和软件技术结合日益密切, 互相渗透。激光雷达和星、弹、机等密切结合的应用系统繁花似锦。纳米级微机械电子系统 (含随动系统等) 和微光子系统等技术成为研制、工艺、生产和应用的主流; 探测、通信和控制的一体化, 多功能化, 微型化, 集成化的系统级硬件和软件结合的芯片成为现实。

(5) 人类所获得的目标信息 75% 来自图像, 三维图像信息获取和分析日益重要。图像信息内容不仅包括位置、速度、方位、姿态等, 而且包括几何形状、表面特性、内部结构、运动和特征量的变化以及生命信息等。三维成像激光雷达逐渐成为发展的主流。

(6) 采用新型可再生能源的节能、洁净的燃料电池和太阳能电池供电, 采用高效节能的发光二极管和激光二极管的数字化激光雷达传感器、通信和控制一体化模块, 已成为传感器网络和信息网络的关键技术及信息社会的“发动机”、“助推器”。拉动和加快微电子、光电子和其他相关材料、元器件、单元模块和功能部件及系统技术的发展。发挥激光没有危害人类的电磁污染的特性, 开发减小对人眼的伤害的“绿色”环保型的激光雷达和光通信将成为可能。

(7) 人类所面临的最大挑战是探测和研究对象转向宇宙和基本粒子世界。研究范围扩展到外层空间, 深入到生命科学、分子及原子范围, 开始注意辐射和宇宙物质、基本粒子、时间和空间等联系。1987 年霍金 (S. Hawking) 在爱因斯坦理论的基础上, 提出辐射与宇宙起源和形成, 与微观基本粒子的关系。激光雷达将为建立起辐射科学与宇宙起源、基本粒子相联系的科学理论和实验研究体

系,揭示广义相对论与光电辐射相关的假设和理论创造条件。各国已经不断将耐恶劣环境的高灵敏度、高精度激光雷达和其他探测系统送往太空,探测月球、火星和其他星球;将激光光束送入心脏,探测和观测病变状况。

进入新世纪前后,人类大胆利用激光雷达等各种光电雷达探索空间、海洋和地球深部。伴随航天科技的发展,一些激光雷达陆续升空,对宇宙进行精确观测。中、美、俄等国太空探测计划,都大量采用激光雷达技术成果、装置,并陆续发射升空。2008年我国的星载激光测距仪已经绘制了月球表面图。2011年我国将发射用于探测黑洞形成的“硬X射线调制望远镜”。我国参与的国际合作“激光干涉仪空间天线”(Laser Interferometer Space Antenna, LISA)太空激光雷达探测器将于2018年发射,探测黑洞碰撞。

60年来,我国先后在跟踪测量激光雷达、反卫星天基精密跟瞄激光雷达、空间飞行器合作目标交会对接激光雷达、精确制导火控激光雷达、巡航导弹图像匹配激光雷达、动目标指示激光雷达、侦察探测打击一体化激光雷达、直升飞机防撞激光雷达、测风激光雷达、气象监测激光雷达、差分吸收激光雷达、环境和化学物监测激光雷达、水下探测激光雷达等的基础研究、关键技术研究、工程预先研究、型号研究等不同阶段,在激光雷达的应用方面都做了大量工作,取得了可喜的成就。

但是和世界先进水平仍有一定的差距,在创新能力、创新绩效方面,特别在有些核心技术的理论和实践,产业链和商品化的建设方面,与国外的差距甚至还相当大。我们还没有像美国麻省理工学院(MIT)林肯实验室那样高水平的,能主导美国激光雷达等光电技术发展主流的研究中心;没有建立起通过长期努力落户在各个航天中心的激光雷达工程及应用研究中心和像贝尔实验室那样完备的、高水平的大公司激光雷达产业链体系。这要求我们必须勇于进行改革,加强基础和核心技术的创新性研究。

世界正在经历一场百年罕见的金融危机,它往往孕育着新的科技革命。在激光雷达技术领域内,微光学技术、集成光学技术等已经使我们研究激光雷达技术的眼光进入到与 μm 量级的波长相当,甚至 nm 的微尺度范围;进入到以光子为主要研究对象时,无论电磁理论,还是量子理论,以及在此理论上建立的技术和工程概念及研究,都有些力不从心,面临着新的理论突破。我们不能总跟踪模仿别人,也不能坐等技术转移,必须依靠自己的力量,重视基础研究和战略高技术研究,拿出原创成果。在科技创新方面必须抢占科技经济制高点,掌握发展的主

动权, 进入创新密集和产业振兴时代, 实现跨越式发展。

所以, 本书还要强调影响着激光雷达发展方向的相关物理规律的光子理论等基础理论研究, 强调建设基于微光学技术和集成光学技术的阵列激光器和探测器的研发中心, 强调建设有关测试、测量和定标中心, 强调全面实行建模与仿真技术的研究等内容。

1.4 激光雷达的分类

首先还是要讨论光电雷达, 图 1.4 所示是辐射探测为基础的光电雷达谱系图, 从整机分为被动式和主动式光电雷达。主动式有发射机系统, 如果是激光光源, 便是主动式激光雷达, 否则便是光雷达。激光雷达按接收技术分为相干式和非相干式。相干式仅指有相干光源的激光雷达, 它的频率、相位、幅度和偏振信息都能接收, 采取相干接收的外差或光子计数方式, 通过后置信号处理实现探测。而非相干式雷达接收以激光能量表达的目标信息, 采取以幅度或能量接收的直接接收方式, 而损失了频率、相位和偏振信息, 这也是大多数光电雷达的接收方式。

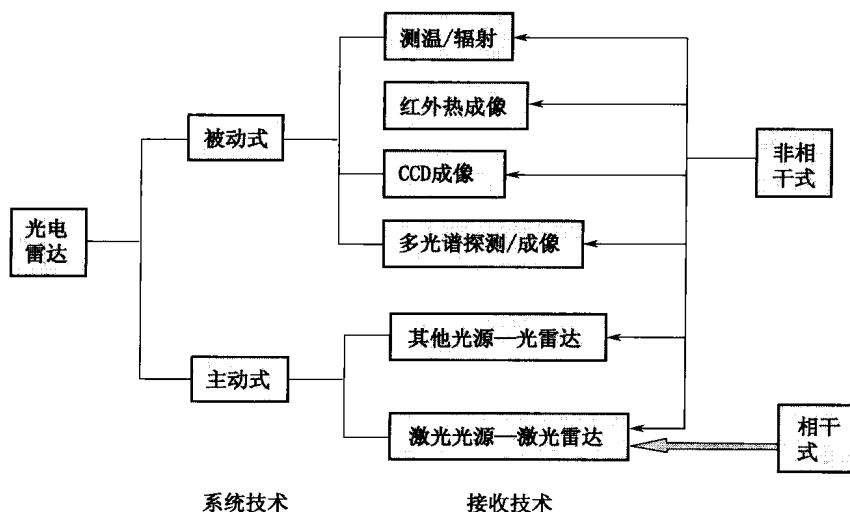


图 1.4 辐射探测为基础的光电雷达谱系图

图 1.5 所示是将激光雷达按整机和接收技术结合的分类。可以看到非相干的光雷达能量接收技术为相干的主动激光接收技术提供了技术基础。再外加激光发射技术, 便成了激光雷达。尽管激光雷达种类繁多, 但最基本、最典型的是测

距、测角的测距与跟踪激光雷达, 本书将详尽介绍, 其他的应用就简单介绍其特点。还应当注意, 激光通信也包含激光发射和接收系统, 因此, 除了信号的形式外, 从物理上, 可和激光雷达都归入相干式主动式光电收发系统, 讨论它们的共性问题。

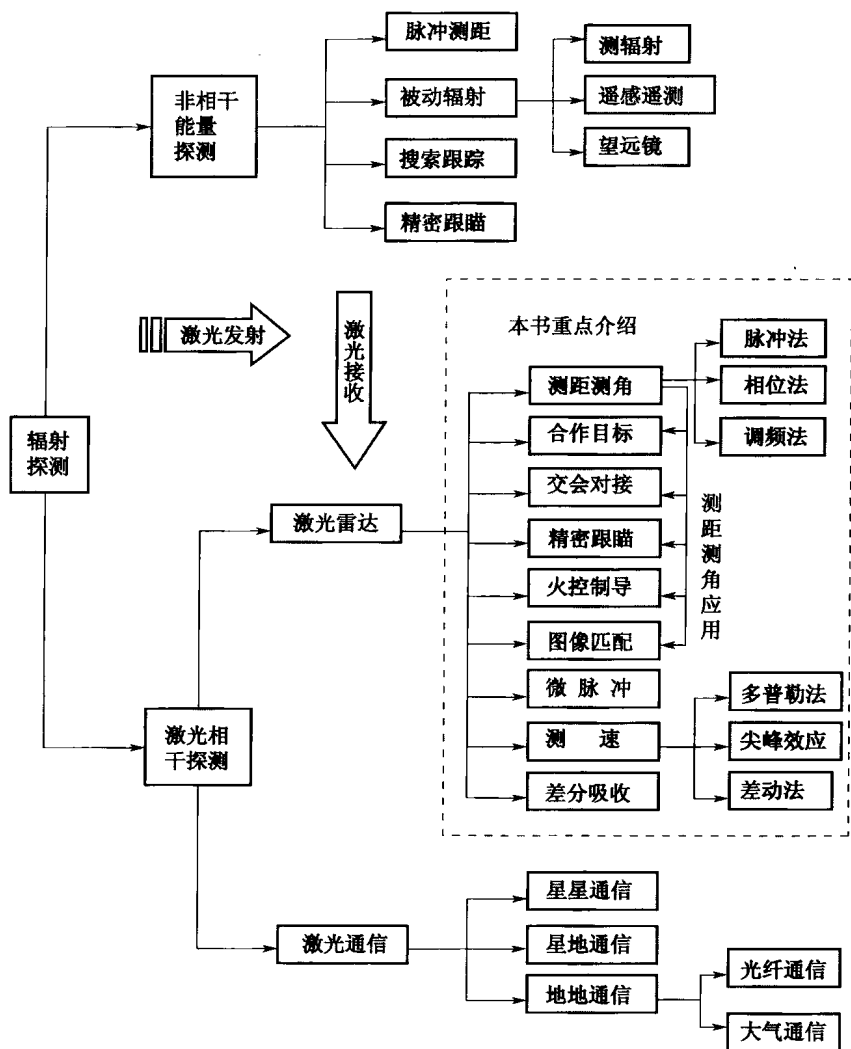


图 1.5 激光雷达分类

实际工程和应用中, 还有以下的分类: 按激光波段分, 有紫外激光、可见激光和红外激光, 甚至在亚毫米波段和微波雷达有所重复; 按激光介质分, 有气体

激光、固体激光、半导体激光、二极管泵浦固体激光和阵列激光等；按激光发射波形及收发体制分，有脉冲激光、连续波调制激光和混合型激光等；按显示方式分，有模拟、数字、成像之分；按运载平台分，有手持式、地基、车载、机载、船载、星载和弹载等；按功能分，有测距、测速、测角和跟踪、目标指示和生物探测等；按用途分，有激光测距仪、靶场激光雷达、火控制导激光雷达、防撞和地形匹配激光雷达、跟踪识别激光雷达、多功能战术激光雷达、水下探测激光雷达、侦毒激光雷达、导航激光雷达、多普勒或尖峰效应测风激光雷达、气象激光雷达、侦毒和大气监测激光雷达等。

本书在讨论基本原理和规律时，以非相干和相干方式为基础叙述。在讨论具体的激光雷达命名时，本书鉴于英语“Lidar”已成为一个常用的不可分割词，译为“激光雷达”，将它为基干词，不再拆开，例如叫激光测距雷达、激光多普勒雷达和“激光××雷达”等。采取在原理和技术前，加置用途限定词分类叙述，如用途功能+（原理/技术）+激光雷达的命名法。例如航天飞行器交会对接合作目标测距测角激光雷达，简称交会对接激光雷达，还有测风多普勒激光雷达等命名。

按照任务的需求，不同功能和用途、不同原理技术的主动/被动模式、各种物理量测量模式，甚至多波段复合的多模复合式激光/光电雷达是今后发展的方向和主流。

1.5 激光雷达的应用

1.5.1 在国防建设中的应用

在现代战争中，对目标的探测和识别，在精确制导技术、反隐身技术、光电对抗技术和C5I（指挥、通信、计算、控制、对抗和情报，Command, Communicate, Compute, Control, Confront and Information）等技术中占有十分重要的地位。获取战场信息权，已成为掌握战争主动权的关键。激光雷达及其相关技术成为信息化指挥系统和武器系统的重要组成部分。激光雷达可昼夜对目标进行探测、跟踪、识别和瞄准。侦察卫星依靠激光多光谱成像可以昼夜获取大量情报；可以提供和鉴别来袭导弹精确信息，争取拦截预警时间；还可对来袭导弹和对方照射源或威胁进行告警，自动发出对抗指令，启动主动干扰设备进行自卫。

利用目标自身辐射或对照射的激光的反射,引导武器系统自动接近目标,可提高打击的精确命中率。焦平面阵列制导还具有识别诱饵能力,有更高的命中率。隐身武器虽然采取了电磁和激光隐身措施,但其温度总比背景温度要高,仍能被探测,可调谐激光雷达和军用夜视仪,具有抗电子干扰能力。对各类目标进行精确定位、跟踪和射击。

光通信系统在发射端,用激光作为载波,将信息实现数字化调制后,发射出去,在接收端接收并解调,获得所需信息。它具有更好的方向性、保密性、抗干扰性,适于大容量、快速保密通信。

C5ISR 中的“C5”代表指挥 (Command)、控制 (Control)、通信 (Communication)、对抗 (Confront) 和计算机 (Computer);“I”代表情报 (Intelligence);“S”代表监听 (Surveillance);“R”代表侦察 (Reconnaissance)。C5ISR 系统是军队的神经中枢,是兵力倍增器,是实施指挥、控制、管理的硬件和软件的总称。利用微波雷达、红外探测、激光雷达等全波段各种传感器和通信设备,通过数码加密将声音、影像、文字等信息传递到远方,并和电报、电话、传真、电视、计算机网络等组成系统。信息传输采用多波段射频/激光通信链。在 C5ISR 系统中,激光雷达和通信很难测听或干扰,保密性好,携带信息量高,非常适合隐蔽使用。它具有环境适应性好,隐蔽性好,抗干扰能力强,能在一定程度上识别伪装目标,且设备体积小,重量轻,功耗低等特点。

图 1.6 所示是阵地信息化指挥网络的车载电磁雷达和激光雷达组合防空火控系统的概念图,车的顶部是第三代微脉冲 (MPL) 激光雷达。其大小比探测目标、制导和干扰的电磁雷达设备小得多。甚至可以装到导弹内,实现自主制导,如图 1.7 所示的车载激光雷达制导的武器系统。

从最初的激光测距仪发展为激光跟踪、激光测速、激光扫描成像、激光多普勒成像等技术,使激光雷达成为多功能系统。主要应用有侦察成像激光雷达、障碍回避激光雷达、地形匹配激光雷达、测风激光雷达、大气监测激光雷达、制导激光雷达、化学/生物战剂探测激光雷达等。

激光雷达的激光光源、探测器、辐射传输、收发系统和信息处理等激光基础技术可以在军用激光技术中得到大量应用。在光电对抗 (Photoelectric Confrontation)、夜视 (Night Vision) 和热成像 (Thermal Imaging)、精确制导 (Precision-Guided)、隐身和反隐身 (Stealth and Anti-stealth) 和光通信 (Optical Communication) 等中发挥巨大作用。



图 1.6 阵地信息化指挥网络的车载防空火控系统

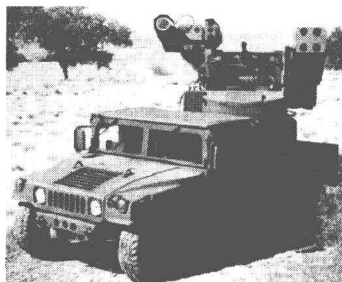


图 1.7 车载激光雷达制导武器系统

1.5.2 在国民经济和日常生活中的应用

激光雷达及其相关技术成果正向国民经济中推广应用，产生巨大的经济效益。主要有：高清晰度电视、三维立体电视和显示器、大屏幕高亮度显示屏、激光投影仪和幻灯机；计算机外部设备和办公设备；工业在线检测和网络监控及激光无损检测、机器人视觉系统、激光加工等；光纤通信和自由空间光通信；企业信息化工程；医疗影像诊断技术、激光多普勒血流计、激光内窥镜和激光治疗仪等，此处不一一列举。

1.6 激光雷达系统工程概念

目前有几十种类型、上百种型号的激光雷达，不可能每种都深入了解。在建立和发展激光雷达产业时，应当从系统工程的概念来看激光雷达的发展，找出共性的规律性的东西。

系统是两个以上有机联系、相互作用的各个要素，用定量和定性结合的系统思想和方法所组成的在一定环境下，具有特定功能、结构的整体。系统通过部件相互协调达到某种目的。它可从元器件、单元模块、功能部件或装置开始，组成分系统、子系统，最后成为大系统，甚至巨系统。系统分为实体系统和概念系统。前者由实体要素，如人、财、物等组成；后者由概念、原理、原则、方法、制度、程序等非物质要素构成。系统设计、开发或组建、系统运转、经营管理，都是二者结合的产物。

各种激光雷达都应有一个如图 1.8 所示的系统工程研究和发展（R&D）流程。

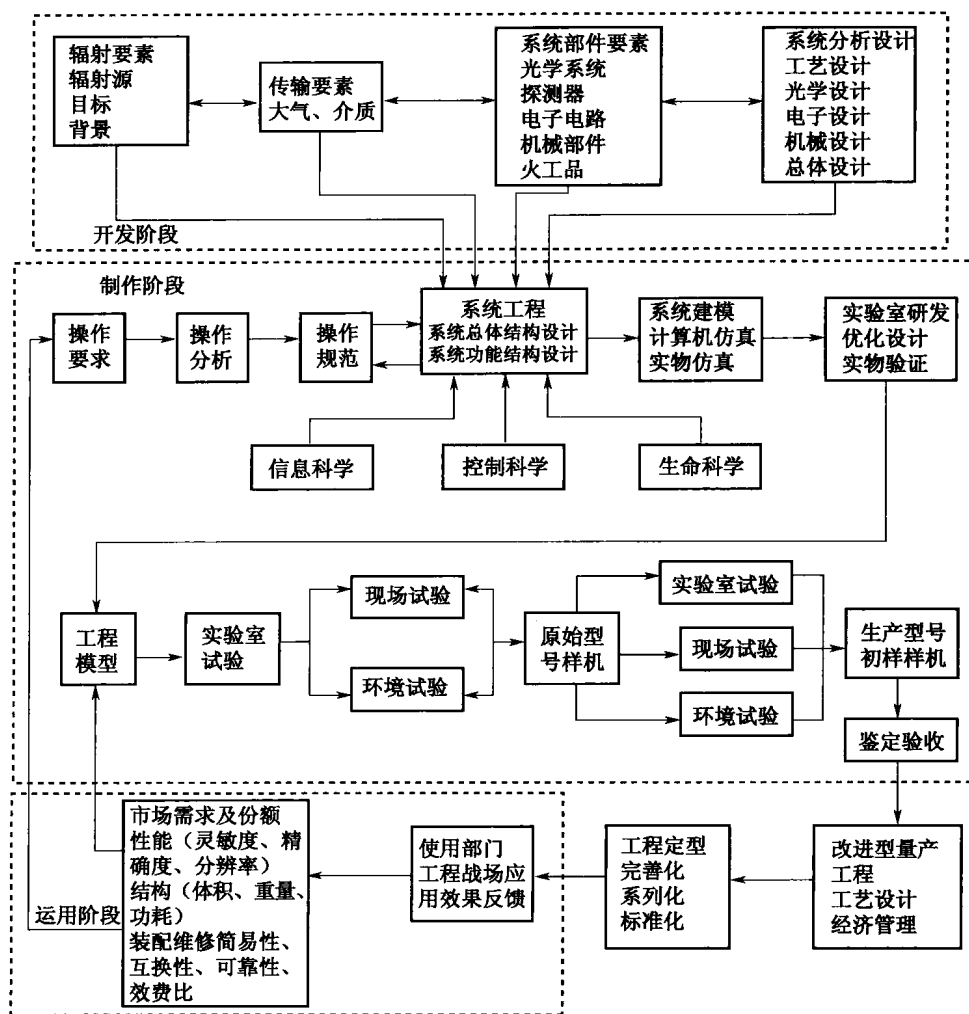


图 1.8 系统工程研究和发展流程

激光雷达除了系统工程本身外，还包括自然现象、生态环境、人类、企业和社会组织，以及管理概念、内容，方法和程序等。激光雷达系统工程与其他工程技术还直接相关，所以，熟悉运用有关其他工程技术的概念、知识和经验是必需的。从学科考虑，不仅包括数、理、化等基础自然科学，以及控制论、信息论、管理科学等工程学科，而且还包括医学、心理学、社会学、经济学等学科。

激光雷达 R&D 应考虑系统工程效益综合性，不仅要考虑技术合理性，更应从总体最优化出发，考虑功能、规划、组成、协调、时限、效费比等组织管理性

质等问题。从系统角度利用系统分析和系统综合方法,对激光雷达系统进行分析、设计、制作和运用。

系统分析是通过建模与仿真,对系统各方面进行预测、优化和评价,以便通过有效的定性与定量分析,得出从分系统、子系统到大系统的性能定量指标,为实现最优系统方案提供决策依据。

系统综合从大系统角度,对系统整体性、目的性、开放性进行综合,实现系统最优化。再对分系统、子系统方案进行比较,综合成若干大系统方案,确定可选的最优方案。

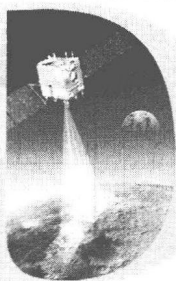
系统的观点、方法、结论和方案要基于控制反馈理论基础,先由激光雷达系统工程的分系统、子系统到大系统等各级系统获取各种信息,进行判断、计算加工、储存、传递,输出必要的信息;再从系统的输出中抽取一部分信号,反馈到系统原端,检验对控制的影响;最终完成对系统的分析和评价,以技术经济和社会效益定量指标衡量系统最优化。

参考文献

- [1] 梅遂生,王戎瑞.光电子技术(第二版).北京:国防工业出版社,2008.
- [2] 杨臣华,梅遂生,林均挺.激光与红外技术手册.北京:国防工业出版社,1990.
- [3] Anderson P H, Lahr C G and Maestre L A. Use of a Laser for Satellite-Range Measurements. Smithsonian Institution Astrophysical Observatory Special Report, 1965.
- [4] 张承铨.国外军用激光仪器手册.北京:兵器工业出版社,1988.
- [5] 倪树新.关于军用激光雷达发展中若干问题的思考和建议.激光雷达技术, No.6, 1995.
- [6] E. Dwek, et al. The COBE Diffuse Infrared Background Experiment search for the cosmic infrared background; IV. Cosmological Implications. Astrophysical Journal, 508, 1998.
- [7] 余允强.物理宇宙学讲义.北京:北京大学出版社,2002.
- [8] 熊辉丰.激光雷达.北京:宇航出版社,1992.
- [9] 路史光.飞航导弹总体设计.北京:宇航出版社,1991.
- [10] 王小谟,匡永胜,陈忠先.监视雷达技术.北京:电子工业出版社,2008.
- [11] 黄德,韦传安,林幼权.机载雷达技术.北京:电子工业出版社,2006.
- [12] 王德纯,丁家会,程望东.精密跟踪测量雷达技术.北京:电子工业出版社,2006.
- [13] 黄槐,齐润东,文树梁.制导雷达技术.北京:电子工业出版社,2006.
- [14] 吴宗凡,柳美琳,张绍举,等.红外与微光技术.北京:国防工业出版社,1998.
- [15] 李仲簋.国防高技术产业化运行机制.北京:国防工业出版社,1995.
- [16] 张召忠.打赢信息化战争.北京:世界知识出版社,2004.
- [17] 王应洛.系统工程.北京:机械工业出版社,2007.
- [18] 高志亮,李忠良.系统工程方法论.西安:西北工业大学出版社,2004.

第 2 章

激光雷达基本物理知识



在激光雷达的特点和未来发展趋势中,基础物理知识和实验方法极为重要。因此,从本章起,将介绍有关激光辐射的基本物理概念、基本物理量和物理规律,介绍它们的度量基础知识和实验方法,在此基础上介绍激光雷达探测原理,为了解激光雷达系统工程的关键技术、系统原理及性能打下基础,以便能开展创造性工作。

2.1 基本物理概念

2.1.1 波长和频率

激光和电磁辐射的波长和频率遵守下列基本关系式

$$\lambda\nu = c \quad (2.1)$$

式中, λ 是波长, ν 是频率, c 是光速。波长的单位以 μm 表示,频率的单位以Hz表示。

当以量子观点研究时,用频率比较方便。有时还引进波数($\tilde{\nu}$)的概念,它是单位距离内波的个数,单位是波长的倒数。它和频率不是一个概念。

$$\text{由于} \quad \tilde{\nu} = \frac{1}{\lambda} \quad (2.2)$$

$$\text{故有} \quad \nu = c\tilde{\nu} \quad (2.3)$$

波长单位换算有 10^4 埃(\AA)= 1 微米(μm)= 10^{-4} 厘米(cm)。由于纳米技术的发展,纳米(nm)单位被越来越多地使用。波长单位也用纳米表示,数量关系为 1 微米(μm)= 10^3 纳米(nm)。

2.1.2 基本物理量

1. 辐射功率 (Radiation Power) P 和辐射通量 (Radiant Flux) Φ

辐射功率为单位时间内发射的辐射能量。

$$P = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta Q}{\Delta t} \right) = \frac{\partial Q}{\partial t} \quad (2.4)$$

式中, Q 是辐射能, P 的单位是瓦(W)或焦耳·秒 $^{-1}$ ($\text{J} \cdot \text{s}^{-1}$)。它是单位时间内通过任意面积的发射、传输、接收的辐射能量,又叫做辐射通量。

$$\Phi = \frac{\partial Q}{\partial t} \quad (2.5)$$

2. 辐出度 (Radiation Flux Density) M

辐出度又称为辐射面发光度、辐射度、辐射出射度、辐射通量密度。对于面辐射源,如图 2.1 所示,单位面积向半球空间发射的辐射通量为

$$\left. \begin{aligned} M &= \frac{\Delta P}{\Delta A} = \frac{\Delta \Phi}{\Delta A} \\ M &= \frac{\partial P}{\partial A} = \frac{\partial \Phi}{\partial A} \end{aligned} \right\} \quad (2.6)$$

式中, A 是面积。 M 的单位是 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。显然有关系式

$$\Phi = \int_A M dA \quad (2.7)$$

3. 辐射强度 (Radiant Intensity) I

对于点辐射源,如图 2.2 所示,在某方向单位立体角发射的辐射功率或辐射通量为

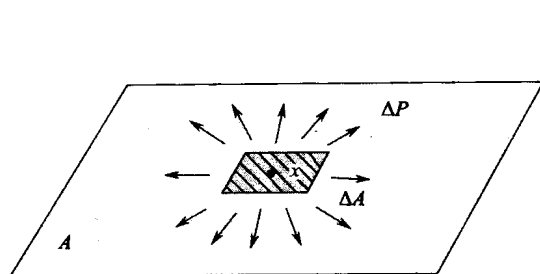


图 2.1 辐出度 M 计算

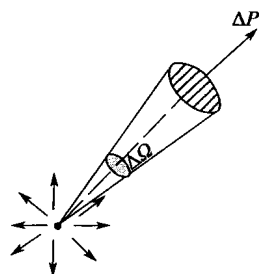


图 2.2 辐射强度 I 计算

$$\left. \begin{aligned} I &= \frac{\Delta P}{\Delta \Omega} = \frac{\Delta \Phi}{\Delta \Omega} \\ I &= \frac{\partial P}{\partial \Omega} = \frac{\partial \Phi}{\partial \Omega} \end{aligned} \right\} \quad (2.8)$$

式中, Ω 是空间立体角。 I 的单位是 $\text{W} \cdot \text{sr}^{-1}$ 。它是点辐射源在某一方向上的辐射强度,即在该方向的单位立体角内所发出的辐射通量。辐射强度用于描述点源特性,当辐射源与观测点之间的距离大于辐射源最大尺寸 10 倍时,可作为点源处理,否则应看成有一定面积的扩展源。

4. 辐射亮度 (Radiance Luminance) L

对于面辐射源,在某方向上,单位投影面积向单位立体角发射的辐射通量,

是辐射源在该方向上的投影面积上、单位立体角内发出的辐射功率。由图 2.3 可知:

面积元 ΔA 向小立体角 $\Delta\Omega$ 内发射的辐射功率是二阶小量 $\Delta(\Delta\Phi) = \Delta^2\Phi$, 在 θ 方向看到的辐射源面积是 ΔA 的投影面积 $\Delta A_\theta = \Delta A \cos\theta$ 。因此, 在 θ 方向上观测到的源表面上该位置的辐射亮度就定义为 $\Delta^2\Phi$ 与 ΔA_θ 及 $\Delta\Omega$ 之比的极限值。

$$L = \lim_{\substack{\Delta A \rightarrow 0 \\ \Delta\Omega \rightarrow 0}} \left(\frac{\Delta^2\Phi}{\Delta A_\theta \Delta\Omega} \right) = \frac{\partial^2\Phi}{\partial A_\theta \partial \Omega} = \frac{\partial^2\Phi}{\partial A \partial \Omega \cos\theta} \quad (2.9)$$

L 的单位是 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ 。

还可以写成

$$L = \frac{\partial I}{\partial A \cos\theta} \quad (2.10)$$

可理解为在某方向上单位投影面积发射的辐射强度。

5. 辐射照度 (Radiant Illuminance) E

在图 2.4 中, 辐射照度是对于接收面或被照射面, 单位面积接收的辐射功率或辐射通量。

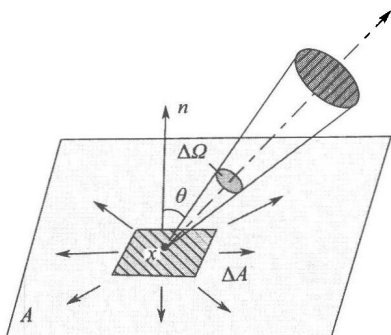


图 2.3 辐射亮度 L 计算

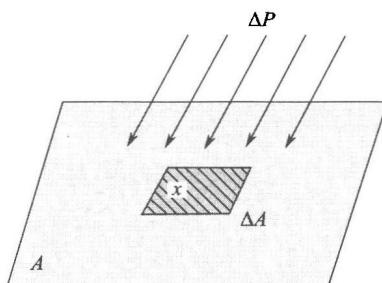


图 2.4 辐射照度 E 计算

$$E = \frac{\partial \Phi}{\partial A} \quad (2.11)$$

E 和 I 有相同的单位, 但辐出度是离开物体, 向半球空间的 2π 立体角的, 而辐射照度是指向物体的, 可能是一个或多个辐射源, 或某一个指定方向的立体角投射的辐射。

2.1.3 光谱物理量

1. 定义

全波段辐射或全辐射 (Total Radiation) 物理量包含波长从 $0 \sim \infty$ 的全部辐射。但任何辐射都具有一定的光谱分布特征, 因此, 都有相应的光谱辐射 (Spectral Radiation) 物理量。定义为: 在波长 λ 附近, 取一极小波长间隔 $\Delta\lambda$, 该波长间隔内的辐射量的微变量为 ΔX , 则其光谱辐射量为

$$X_\lambda = \lim_{\Delta\lambda \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta X}{\Delta\lambda} \right) = \frac{\partial X}{\partial \lambda} \quad (2.12)$$

它和全辐射量的关系为

$$X = \int_0^\infty X_\lambda d\lambda \quad (2.13)$$

由式 (2.12), 可以得到各辐射光谱量分别是:

光谱辐射功率 P_λ 和光谱辐射通量 Φ_λ , 单位为 $\text{W} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ 。

$$P_\lambda = \lim_{\Delta\lambda \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta P}{\Delta\lambda} \right) = \frac{\partial P}{\partial \lambda} \quad (2.14)$$

$$\Phi_\lambda = \frac{\partial \Phi}{\partial \lambda} \quad (2.15)$$

光谱辐出度 M_λ , 单位为 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ 。

$$M_\lambda = \frac{\partial M}{\partial \lambda} \quad (2.16)$$

光谱辐射强度 I_λ , 单位为 $\text{W} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ 。

$$I_\lambda = \frac{\partial I}{\partial \lambda} \quad (2.17)$$

光谱辐射亮度 L_λ , 单位为 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ 。

$$L_\lambda = \frac{\partial L}{\partial \lambda} \quad (2.18)$$

光谱辐射照度 E_λ , 单位为 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ 。

$$E_\lambda = \frac{\partial E}{\partial \lambda} \quad (2.19)$$

2. 全辐射量与光谱辐射量的关系

辐射功率 P 和辐射通量 Φ

$$P = \int_0^{\infty} P_{\lambda} d\lambda \quad (2.20)$$

$$\Phi = \int_0^{\infty} \Phi_{\lambda} d\lambda \quad (2.21)$$

辐出度 M

$$M = \int_0^{\infty} M_{\lambda} d\lambda \quad (2.22)$$

辐射强度 I

$$I = \int_0^{\infty} I_{\lambda} d\lambda \quad (2.23)$$

辐射亮度 L

$$L = \int_0^{\infty} L_{\lambda} d\lambda \quad (2.24)$$

辐射照度 E

$$E = \int_0^{\infty} E_{\lambda} d\lambda \quad (2.25)$$

2.1.4 光子物理量

从光子的角度考虑, 以光子数计量, 可得到光子辐射 (Photon Radiation) 物理量。

若某波长的一个光子的能量为

$$\epsilon = h\nu = hc\tilde{\nu} = h \frac{c}{\lambda} \quad (2.26)$$

则有光子数

$$N_p = \int dN_p = \frac{1}{hc} \int \lambda Q_{\lambda} d\lambda \quad (2.27)$$

式中, Q_{λ} 是在某一波长的辐射能量, h 是普朗克常数, N_p 的下标 p 表示光子。

于是一定温度 T 下的辐射能为

$$Q(T) = N_p \epsilon = N_p h\nu = N_p hc\tilde{\nu} = N_p h \frac{c}{\lambda} \quad (2.28)$$

光波段单光子能量如表 2.1 所示, 红外波段的不同波长激光的单光子能量如表 2.2 所示。

表 2.1 光波段单光子能量

波 谱 区	波长 λ	频率 ν/Hz	单光子能量 ε/eV
微波	300~1 mm	$1 \times 10^9 \sim 3 \times 10^{12}$	$4 \times 10^{-6} \sim 4 \times 10^{-3}$
红外	1mm~0.76 μm	$3 \times 10^{12} \sim 4.3 \times 10^{14}$	$4 \times 10^{-3} \sim 1.7$
可见光	0.76~0.38 μm	$4.3 \times 10^{14} \sim 5.7 \times 10^{14}$	1.7~2.3
紫外光	0.38~0.01 μm	$5.7 \times 10^{14} \sim 10^{16}$	2.3~40
X 射线	10~0.03nm	$10^{16} \sim 10^{19}$	40~4 000
Γ 射线	<0.03nm	$>10^{19}$	>4 000

表 2.2 红外波段的单光子能量

波长 $\lambda/\mu\text{m}$	0.76	1.0	1.3	3.0	5.0	12.0	10^3
单光子能量 ε/eV	1.53	1.17	0.91	0.39	0.23	0.10	1.23×10^{-3}

注：单光子能量的单位为电子伏特 (eV)，其中 e 就是电子电量，V 就是电压单位“伏特”，故 $1\text{eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{J}$ 。

于是得到：

光子辐射通量 Φ_p ，单位为 s^{-1} 。

$$\Phi_p = \frac{\partial N_p}{\partial t} \quad (2.29)$$

光子辐出度 M_p ，单位为 $\text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

$$M_p = \frac{\partial \Phi_p}{\partial A} \quad (2.30)$$

光子辐射强度 I_p ，单位为 $\text{s}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ 。

$$I_p = \frac{\partial \Phi_p}{\partial \Omega} \quad (2.31)$$

光子辐射亮度 L_p ，单位为 $\text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ 。

$$L_p = \frac{\partial^2 \Phi_p}{\partial A \partial \Omega \cos \theta} \quad (2.32)$$

光子辐射照度 E_p ，单位为 $\text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

$$E_p = \frac{\partial \Phi_p}{\partial A} \quad (2.33)$$

2.1.5 光学量

光波段也是辐射的一个波段，许多情况下，需要用光学量来描述辐射。

表 2.3 列出辐射量与光学量的关系。光学量的下标均以频率 ν 表示。

表 2.3 辐射量与光学量的关系

辐 射 量			光 学 量			物 理 意 义
名 称	符 号	单 位	名 称	符 号	单 位	
辐射能	Q	J	光能	Q_ν	$\text{lm} \cdot \text{s}$	辐射能量
辐射功率/ 通量	P/Φ	W	光通量	Φ_ν	lm	单位时间的辐射能量
辐出度	M	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	光出射度	M_ν	cd	单位时间、单位面积的辐射能量
辐射强度	I	$\text{W} \cdot \text{sr}^{-1}$	光强度	I_ν	$\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$	单位时间向单位立体角的辐射能量
辐射亮度	L	$\text{W} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$	光亮度	L_ν	$\text{lm} \cdot \text{m}^{-2}$	单位时间、单位面积向单位立体角的辐射能量
辐射照度	E	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	光照度	E_ν	lx	单位时间的辐射能量

光学量与人眼的视觉有关, 辐射量与光学量之间有一定的关系。二者以光视效能 K 、光谱光视效能 K_λ 、最大光谱光视效能 $K_{\lambda\text{max}}$ 和光谱光视效率 V_λ 联系。

2.1.6 辐射和物质相互作用的基本物理量

这里只给出定义式, 其物理意义以后在讨论辐射传输时介绍。

1. 吸收特性

1) 吸收 (Absorption) 系数 (吸收比、吸收率)

在一定温度 T 下, 物体吸收比为

$$a(T) = \frac{\Phi_a}{\Phi_0} \quad (2.34)$$

式中, Φ_a 是被吸收的辐射通量, Φ_0 是入射的辐射通量。它为无量纲的数。

2) 单色吸收 (Monochromatic Absorption) 系数

对于某一波长 λ 的物体吸收比为

$$a(\lambda, T) = \frac{\Phi_a(\lambda, T)}{\Phi_0(\lambda, T)} \quad (2.35)$$

2. 反射特性

1) 反射 (Reflectance) 系数 (反射比、反射率)

在一定温度 T 下, 物体反射比为

$$\rho(T) = \frac{\Phi_p}{\Phi_0} \quad (2.36)$$

式中, Φ_p 是被吸收的辐射通量。它也为无量纲的数。

2) 单色反射 (Monochromatic Reflectance) 系数

$$\rho(\lambda, T) = \frac{\Phi_p(\lambda, T)}{\Phi_0(\lambda, T)} \quad (2.37)$$

3) 不透明物体的吸收和反射关系

$$a(\lambda, T) + \rho(\lambda, T) = 1 \quad (2.38)$$

3. 透射特性

1) 透射 (Transmittance) 系数 (透射比、透射率)

在一定温度 T 下, 物体透射比为

$$\tau(T) = \frac{\Phi_\tau}{\Phi_0} \quad (2.39)$$

式中, Φ_τ 是被吸收的辐射通量。它仍为无量纲的数。

2) 单色 (Monochromatic Transmittance) 透射系数

$$\tau(\lambda, T) = \frac{\Phi_\tau(\lambda, T)}{\Phi_0(\lambda, T)} \quad (2.40)$$

3) 透明物体的吸收和反射及透射关系

$$a(\lambda, T) + \rho(\lambda, T) + \tau(\lambda, T) = 1 \quad (2.41)$$

4. 绝对黑体 (黑体) (Absolute Black Body)

在相同时间内, 温度 T 不变, 物体发射的辐射功率与吸收的辐射功率相等, 则为平衡热辐射。若吸收比

$$a(\lambda, T) = 1 \quad (2.42)$$

物体吸收所有入射光, 则这样的物体便是绝对黑体。

2.2 基本物理定律

黑体辐射是研究各种辐射的基础, 激光雷达服从基本辐射定律。熟悉和运用这些定律是必要的。

2.2.1 理想黑体与基尔霍夫定律

各种不同材料和结构的物体, 对外来辐射的吸收, 以及本身对外的辐射都不相同。理想黑体 (Ideal Black Body) 在任何温度下吸收一切辐射, 即对一切波长入射的辐射的吸收系数都等于 1。

实际上, 自然界任何物体对不同波长的入射辐射都有一定的反射, 即吸收系数不等于 1。若该物体的吸收系数为 α , 对该物体的辐射照度为 E , 辐射出射度 $M(T)$ 应等于它所吸收的辐射功率, 则应有

$$M(T) = \alpha E \quad (2.43)$$

由此, 可得出物体所吸收的辐射功率, 即辐射照度 E 为比值 M/α , 与物体的性质无关, 等于同一温度下黑体的辐射出射度 $M_b(T)$ 。

基尔霍夫 (Kirchhoff) 定律指出: 由于黑体的吸收比与波长无关, 它是等于 1 的常数, 即 $\alpha_b(T) = 1$ 。处于热平衡时, 黑体具有最大的吸收比, 也就有最大的单色辐出度。

$$\frac{M_{\lambda b}}{\alpha_{\lambda b}} = M_{\lambda b} = f(\lambda, T) \quad (2.44)$$

式中, $M_{\lambda b}(T)$ 表示在一定的温度 T 下的绝对黑体单色辐出度, $\alpha_{\lambda b}$ 为该温度下的吸收比系数。黑体的单色辐出度 $M_{\lambda b}(T)$ 等于普适函数 $f(\lambda, T)$ 。因此, 研究 $M_{\lambda b}(T)$ 就成为研究热辐射的关键。

黑体只是一种理想情况, 用不透明材料做一个闭合空腔, 在空腔表面开一小孔, 小孔表面就可以模拟黑体表面, 或把一个物体表面涂上一层黑色物质 (散射层) 模拟黑体。

如图 2.5 所示, 从外面射来的辐射, 经小孔射入空腔, 或如图 2.6 所示, 内部产生的辐射, 要在腔壁上经过多次反射, 才可能有机会射出小孔。因此, 在多次反射过程中, 外面射来的辐射几乎全部被腔壁吸收; 内部产生的辐射也只有极少数可以射出。

实验所用的绝对黑体都是空腔辐射器，黑体辐射又可称为空腔辐射。所以，黑体只是抽象的理想化模型。但黑体热辐射的基本规律是辐射研究及应用的基础，它揭示了黑体发射的辐射随温度及波长变化的定量关系。

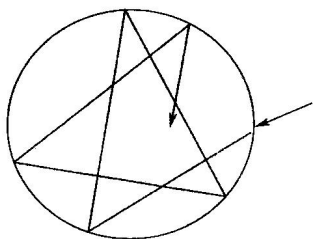


图 2.5 空腔吸收型黑体模型

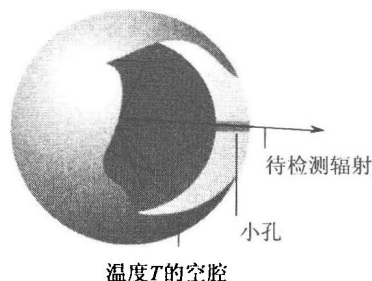


图 2.6 内部辐射型黑体模型

2.2.2 朗伯余弦定律

朗伯余弦 (Lambert Cosine) 定律指出：绝对黑体在任意方向上的辐射强度与观测方向相对于辐射表面法线夹角的余弦成正比，如图 2.7 所示。

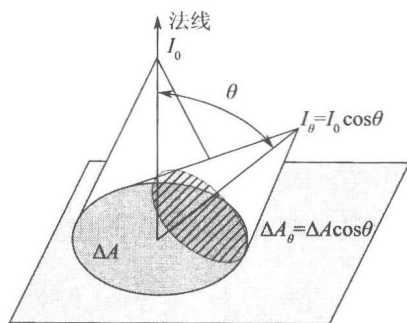


图 2.7 辐射的空间分布规律

任意方向的辐射强度为

$$I_{\theta} = I_0 \cos \theta \quad (2.45)$$

此定律表明，黑体在辐射表面法线方向的辐射最强。因此，辐射探测时，应尽可能选择在被测表面法线方向进行，如果在与法线成 θ 角方向检测，则接收到的辐射信号将减弱成法线方向最大值的 $\cos \theta$ 倍。

有关此电子书的说明

本人可以帮助你找到你要的PDF电子书，计算机类，文学，艺术，设计，医学，理学，经济，金融等等。质量都很清晰，为方便读者阅读观看，每本100%都带可跳转的书签索引和目录，只要您提供给我书的相关信息，一般我都能找到，如果您有需求，请联系我 QQ1779903665。

PDF代找说明：

本人已经帮助了上万人找到了他们需要的PDF，其实网上有很多PDF,大家如果在网上不到的话，可以联系我QQ，大部分我都可以找到，而且每本100%带书签索引目录。因PDF电子书都有版权，请不要随意传播，如果您有经济购买能力，请尽量购买正版。

提供各种书籍的pd电子版代找服务，如果你找不到自己想要的书的pdf电子版，我们可以帮您找到，如有需要，请联系 QQ 1779903665.

备用:QQ 461573687

声明：本人只提供代找服务，每本100%索引书签和目录，因寻找和后期制作pdf电子书有一定难度，仅收取代找费用。如因PDF产生的版权纠纷，与本人无关，我们仅仅只是帮助你寻找到你要的pdf而已。