



国家出版基金资助项目·“十二五”国家重点图书

航天科学与工程专著系列

LASER RADAR SYSTEMS DESIGN

激光雷达系统设计

● 王春晖 陈德应 著



哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS



国家出版基金资助项目·“十二五”

航天科学与工程专著系列

LASER RADAR SYSTEMS DESIGN

激光雷达系统设计

● 王春晖 陈德应 著



哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内容提要

本书系统地讲述了激光雷达系统分析和设计的全过程,并给出了大多数经过实践考验的设计实例。本书主要研究内容包括:激光雷达系统设计基础、光学天线与光机扫描系统、激光雷达方程、目标检测、波形与信号处理、系统设计典型实例等。读者可根据需要从中直接选用或稍做修改即可使用。

本书可作为电子科学与技术相关专业研究生的参考教材,也可供激光雷达工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

激光雷达系统设计/王春晖,陈德应著. —哈尔滨:

哈尔滨工业大学出版社,2014.1

国家出版基金资助项目·“十二五”国家重点图书·航天科学与工程专著系列

ISBN 978—7—5603—4022—7

I. ①激… II. ①王… ②陈… III. ①激光雷达—系统设计
IV. ①TN958.98

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 046830 号



策划编辑 杜 燕 赵文斌

责任编辑 刘 瑶 杜 燕 李子江 赵文斌

封面设计 高永利

出版发行 哈尔滨工业大学出版社

社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006

传 真 0451—86414749

网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>

印 刷 黑龙江省地质测绘印刷中心印刷厂

开 本 787mm×960mm 1/16 印张 19.75 字数 350 千字

版 次 2014 年 1 月第 1 版 2014 年 1 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978—7—5603—4022—7

定 价 58.00 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

前 言

美国国际电话和电报公司为了解决航天飞行器交会对接问题,最早提出了激光雷达的概念。自 1972 年起,美国麻省理工大学林肯实验室与国家航天局马歇尔航天中心长期合作,成功研制出著名的“Friepond”CO₂ 激光雷达,1990 年实现了 800~1 000 km 空间目标的跟踪,极大地促进了各种用途激光雷达的发展。尤其是进入 21 世纪以后,激光雷达已在激光主动成像制导、激光三维成像、激光测绘、激光遥感、激光空间交会对接等诸多领域得到了广泛应用,并日益受到科研和应用部门的高度关注。

2000 年,哈尔滨工业大学为物理电子学学科的硕士研究生开设了“激光雷达技术”讲座,引起了选修该课程学生的极大兴趣和热情,特别是近几年来激光雷达技术的发展非常迅猛,应用领域逐渐拓展,2009 年,该课程调整为本专业硕士研究生的学位课。目前,国内已出版了多部关于激光雷达的专著,多数内容单一且多侧重于基本原理与结构,缺乏激光雷达系统级设计的介绍和典型范例,而这些知识大多散落在期刊和各式各样的论文中。为此,作者结合多年激光雷达教学与科研实践经验,尝试从激光雷达系统级设计出发,以激光雷达的激光发射、光学系统、激光接收和信号处理四大模块为主线,依次阐述激光雷达系统设计基础、光学天线与光机扫描系统、激光雷达方程、目标检测、波形与信号处理等各个子系统分析与系统建模的全过程,力图使读者了解和掌握激光雷达系统的基本设计方法和经验,并通过典型设计实例分析,从中借鉴他人的成功经验。

本书第 1 章主要阐述激光雷达的基本概念与定义、系统建模、光电信号的探测方法、应用与发展等内容。第 2 章主要阐述光学天线的视场、光学天线的方向图函数、直接探测光学天线、相干探测光学天线、平面摆镜扫描、旋转多面体的反射棱柱扫描、旋转折射光楔扫描、微机电系统扫描以及扫描滞后角效应等内容。第 3 章主要阐述传递函数、非相干激光雷达方程、相干激光方程、激光雷达的信号回波和单次后向散射激光雷达方程计算方法等内容。第 4 章主

要阐述噪声中的信号检测、虚警概率与检测概率、脉冲积累、起伏目标检测、恒虚警检测等内容。第5章主要阐述波形类型、模糊函数和信号处理等内容。

本书在编写过程中,皮名嘉教授、尚铁梁教授、于海鹏教授和王骐教授给予了悉心的指导和大力帮助,他们的学识和经验,使作者终身受益,永生难忘。俄罗斯莫斯科鲍曼国立技术大学 M. Л. Велов 教授向作者提供了俄罗斯激光雷达研究的大量文献资料,也为此书的成稿发挥了重要作用,在此深表敬意和感谢。

由于时间仓促,书中不妥或疏漏之处在所难免,恳请同行专家批评指正。

作者

2012年10月

目 录

第 1 章 激光雷达系统设计基础	(1)
1.1 基本概念与定义	(1)
1.1.1 系统结构	(3)
1.1.2 激光器	(6)
1.1.3 光学系统	(10)
1.1.4 光电探测器	(18)
1.1.5 信号处理模块	(26)
1.2 系统建模	(32)
1.2.1 激光发射机	(32)
1.2.2 激光接收机	(39)
1.2.3 激光传输特性	(42)
1.2.4 目标特性	(47)
1.3 微弱光信号的探测方法	(52)
1.3.1 光电子的统计规律	(52)
1.3.2 直接探测	(54)
1.3.3 传统外差探测	(58)
1.3.4 平衡外差探测	(66)
1.4 应用与发展	(69)
1.4.1 跟踪激光雷达	(69)
1.4.2 成像激光雷达	(71)
1.4.3 后向散射激光雷达	(73)

1.4.4	空间激光雷达	(75)
1.4.5	水下激光雷达	(76)
1.4.6	未来发展趋势	(76)
第2章	光学天线与光机扫描系统	(78)
2.1	引言	(78)
2.2	光学天线的视场	(79)
2.2.1	衍射极限视场	(79)
2.2.2	光接收机视场	(81)
2.3	光学天线的方向图函数	(82)
2.3.1	方向图函数的定义	(82)
2.3.2	光学天线效率	(84)
2.4	直接探测光学天线	(85)
2.4.1	焦平面上直接探测效率	(86)
2.4.2	离焦平面上直接探测效率	(88)
2.4.3	提高直接探测效率的光学方法	(90)
2.5	相干探测光学天线	(97)
2.5.1	相干探测信号模型	(97)
2.5.2	均匀光束光学天线特性	(99)
2.5.3	均匀光束艾里斑光学天线特性	(101)
2.5.4	高斯光束艾里斑光学天线特性	(105)
2.6	光机扫描系统	(112)
2.6.1	光机扫描概述	(112)
2.6.2	平面摆镜扫描	(114)
2.6.3	旋转多面体的反射棱柱扫描	(120)
2.6.4	旋转折射光楔扫描	(125)
2.6.5	微机电系统扫描	(128)
2.6.6	扫描视场滞后效应	(135)

第 3 章 激光雷达方程	(138)
3.1 传递函数	(138)
3.1.1 线性系统数学模型	(139)
3.1.2 光学传递函数	(142)
3.1.3 其他子系统的传递函数	(145)
3.1.4 系统总调制传递函数	(146)
3.2 非相干激光雷达方程	(147)
3.2.1 小角近似光亮度传递方程	(148)
3.2.2 光学互易定理	(151)
3.2.3 非相干激光雷达方程的一般形式	(154)
3.2.4 后向散射非相干激光雷达方程	(156)
3.3 相干激光雷达方程	(160)
3.3.1 惠更斯-亥姆霍斯波动方程	(161)
3.3.2 相干光学系统能量传递方程	(164)
3.3.3 收发合置相干激光雷达方程	(168)
3.4 激光雷达的信号回波	(170)
3.4.1 信号与干扰	(170)
3.4.2 散射介质中的信号回波	(172)
3.5 单次后向散射激光雷达方程的计算方法	(174)
3.5.1 单次后向散射激光雷达探测方法	(174)
3.5.2 大气光学参数反演算法	(176)
第 4 章 目标检测	(181)
4.1 噪声中的信号检测	(181)
4.1.1 噪声的统计特性	(181)
4.1.2 包络检波器	(184)
4.1.3 检波器与门限判决	(185)
4.2 虚警概率与检测概率	(189)

4.2.1	虚警概率	(189)
4.2.2	检测概率	(191)
4.3	脉冲积累	(193)
4.3.1	相干积累	(194)
4.3.2	非相干积累	(196)
4.3.3	二进制积累	(199)
4.4	起伏目标检测	(201)
4.4.1	门限的选择	(202)
4.4.2	检测概率的计算	(205)
4.5	恒虚警率	(212)
4.5.1	单元平均 CFAR(单个脉冲)	(213)
4.5.2	非相干积累单元平均 CFAR	(215)
第 5 章	波形与信号处理	(217)
5.1	波形的类型	(217)
5.1.1	低通、带通信号和正交分量	(217)
5.1.2	解析信号	(218)
5.1.3	连续和脉冲波形	(219)
5.1.4	线性调频波形	(223)
5.1.5	相位编码波形	(229)
5.1.6	波形分辨率和模糊	(231)
5.2	模糊函数	(237)
5.2.1	引言	(238)
5.2.2	典型波形的模糊函数	(240)
5.2.3	模糊函数等高图	(252)
5.2.4	数字编码波形	(254)
5.3	信号处理	(263)
5.3.1	信号调理	(264)

目 录

5.3.2 模数转换器 ADC 及量化效应	(268)
5.3.3 下变频技术	(274)
5.3.4 脉冲压缩技术	(278)
参考文献	(291)
名词索引	(294)

第 1 章 激光雷达系统设计基础

激光雷达系统设计需要了解 and 掌握非常广博和扎实的基础理论知识,如激光技术、光电探测技术、光学工程、信号处理、图像处理、控制以及精密机械等诸多领域的知识。本章从激光雷达的基本概念和定义出发,分别给出激光雷达系统中核心器件,包括激光器、光学系统、探测器和信号处理模块的主要设计参数和数学模型,讨论激光发射机、激光接收机、激光传输介质、目标以及信号处理模块的各个子系统分析与整个系统建模过程;再根据光电转换半经典理论,讨论光电信号的直接探测和外差探测方法,引出探测效率的概念作为激光雷达系统设计的指导思想;最后,总结现代激光雷达的主要应用与发展趋势。

1.1 基本概念与定义

传统的“雷达”(Radio Detection And Ranging,RADAR)是以微波和毫米波作为载波的雷达,大约出现在 1935 年。

激光雷达(Laser Detection And Ranging,LADAR)是指以激光作为载波、以光电探测器作为接收器件、以光学望远镜作为天线的光雷达。如以激光测距机为标志,最早出现在 1961 年。早期,人们还叫过光雷达(Light Detection And Ranging,LIDAR),这里所谓的光实际上是指激光。现在普遍采用 LADAR 这个术语,以区别于原始而低级的 LIDAR。

通过对微波雷达、毫米波雷达和激光雷达典型性能的分析比较(表 1.1) 可以清楚地看出,微波雷达在作用距离、目标搜索、捕获能力、多目标探测能力和全天候工作能力等方面具有优势;激光雷达在跟踪测量精度、目标识别能力、低空跟踪能力、抗电子干扰能力、抗反辐射导弹能力、低截获概率和抗隐身性能方面具有优势。同时还可以看出,一般来说,凡是微波雷达的弱点,往往是激光雷达的优点,而激光雷达的缺点,恰恰又是微波雷达的优点,毫米波雷达的性能介于二者之间。正是这种性能上的明显差异和良好的互补性,确定了三者互补共存而不能彼此取代的关系。

随着激光技术和相关器件及其技术的逐渐成熟,激光雷达已取得了长足的发展,其独特的技术优势越来越被人们所认识,其间不仅研制出了不同体制、不同用途的多种样机,演示和验证了它的技术潜力,而且有的已投入使用。实践证明,激光雷达具有以下几大明显优点。

(1) 工作频率非常高(较微波高 3 ~ 4 个数量级)

激光作为雷达辐射源探测运动目标时多普勒频率非常高,因而速度分辨率极高。工作频率处于电子干扰频谱和微波隐身有效频率之外,有利于对抗电子干扰和反隐身。有效的绝对带宽很宽,能产生极窄的脉冲(纳秒至飞秒量级),以实现高精度(可达厘米量级)测距。

(2) 单色性和相干性好

气体激光器的谱线宽度可达 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ nm,而且频率稳定度能做得很高,可实现高灵敏度外差接收。

(3) 能量高度集中

用很小的准直孔径(约 10 cm) 即可获得很高的天线增益和极窄的波束(约 1 mrad),

而且无旁瓣,因而可实现高精度测角(优于 0.1 mrad)、单站定位、低仰角跟踪和高分辨率三维成像,且不易被敌方截获,自身隐蔽性强。

表 1.1 各种频段雷达综合性能的宏观比较

宏观评价	雷达种类	微波雷达	毫米波雷达	激光雷达
	综合性能			
跟踪测量精度		下	中	上
作用距离		上	中	下
目标搜索和捕获能力		上	中	下
目标识别能力		下	中	上
全天候工作能力		上	中	下
抗电子干扰能力		下	中	上
抗反辐射导弹能力		下	中	上
抗隐身目标能力		下	中	上
低仰角跟踪能力		下	中	上
低截获概率能力		下	中	上
多目标探测和跟踪能力		上	中	下
技术成熟程度		上	中	下

1.1.1 系统结构

激光雷达是以激光器为辐射源的雷达,它是在微波雷达技术的基础上发展起来的,所

以两者在工作原理和结构上有许多相似之处。但是,由于辐射源不同,主要是工作频率由无线电频段改为光频段,因而除了功率器件外,在雷达具体结构、目标和背景特性上发生了变化,例如,微波天线由光学望远镜代替,在接收通道中,微波雷达可以直接用射频器件对接收信号进行放大、混频和检波等处理,激光雷达则必须用光电探测器将光频信号转换成电信号后进行处理。至于信号处理,激光雷达基本上沿用了微波雷达中的成熟技术。

图 1.1 所示给出了激光雷达系统总体结构框图,具体定义和工作过程如下:

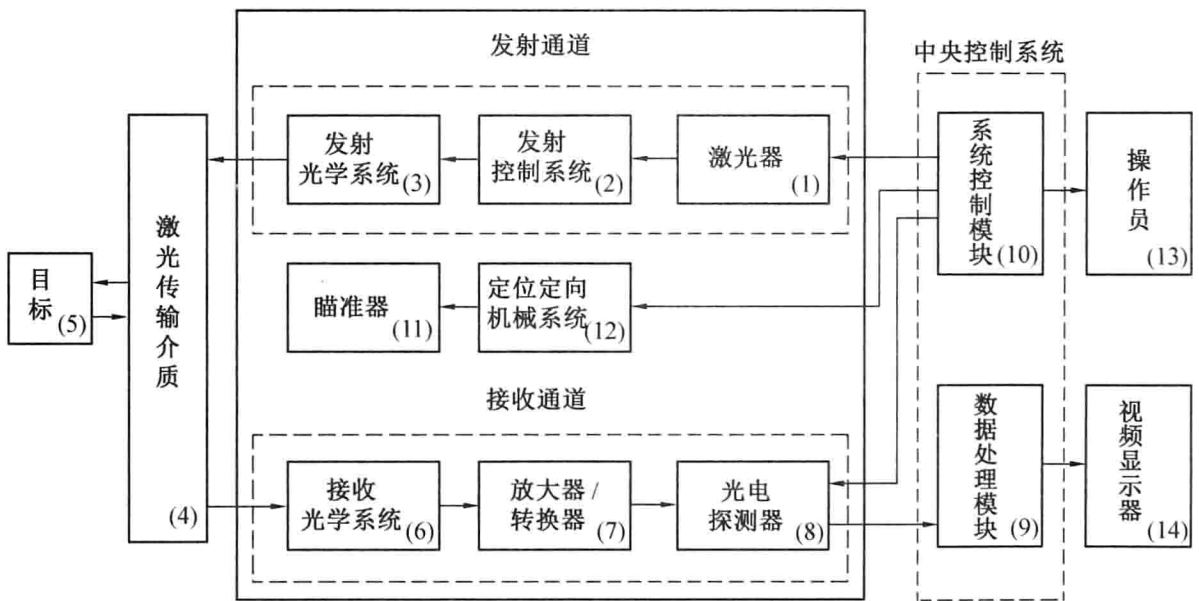


图 1.1 激光雷达系统总体结构框图

(1) 为激光雷达的核心器件——激光器,(2) 为发射控制系统(激光扫描或调制控制装置),(3) 为发射光学系统(望远镜和扩束镜),(4) 为激光传输介质(大气、水或宇宙空间),其中(1) ~ (4) 构成发射通道。

(6) 为接收光学系统(望远镜和物镜),(7) 为放大器/转换器(信号调理与 ADC),(8) 为光电探测器(实现光信号到电信号的转换),其中(4)、(6) ~ (8) 构成接收通道;(5) 为目标,目标具有某种光谱反射系数空间分布 $\rho_\lambda(x, y)$ (针对特定的光谱辐射随着强

度而变化)。

(9) 为信号与数据处理模块, (10) 为系统控制模块(将进行如脉冲控制、系统初始化, 以及完成操作员的指令), (14) 为视频显示器, 其中(9) ~ (10) 构成中央控制系统, 信号与数据处理模块主要对接收的信号进行检测与处理, 然后送入视频显示器。

在自然光照射条件下, 操作员(13) 借助瞄准器(11) 操作定位定向机械系统(12) 将激光雷达系统的光轴引导到目标区域。操作员根据需要可手动或自动在视频显示器(14) 上观测到目标的信息。

图 1.2 所示为根据激光器所发射光束的发散角和光接收机视场之间的关系, 如激光束发散角为 $2\alpha_t$ (平面角)、光接收机视场角为 $2\alpha_R$ (平面角), 则可以提出激光雷达系统 3 种方案: 激光束发散角小于接收机视场(窄光束—宽视场)、激光束发散角与接收机视场接近(窄光束—窄视场) 和激光束发散角大于接收机视场(宽光束—窄视场)。

① 在第一种激光雷达系统中, 激光发射机光束发散角比较窄, 激光接收机视场则比较宽, 即 $\alpha_t \ll \alpha_R$ 。为了得到目标区的完整图像, 必须配备光机扫描系统, 其光电探测器应为单元探测器。

② 在第二种激光雷达系统中, 激光发射机光束发散角与激光接收机视场非常接近, 即 $\alpha_t \approx \alpha_R$ 。为了得到目标区的完整图像, 也必须配备光机扫描系统, 探测方式也为单元探测, 光机扫描的水平和垂直应与视频要求一致。

③ 在第三种激光雷达系统中, 激光发射机光束发散角比较宽, 激光接收机视场则比较窄, 即 $\alpha_t \gg \alpha_R$ 。这时就不需要复杂的光机扫描系统了, 探测方式为多元探测, 这对多元探测器的响应时间提出了更严格的要求。

激光雷达的基本构成与微波雷达大同小异, 不同的是发射源、发射 / 接收天线和回波

信号敏感器件。

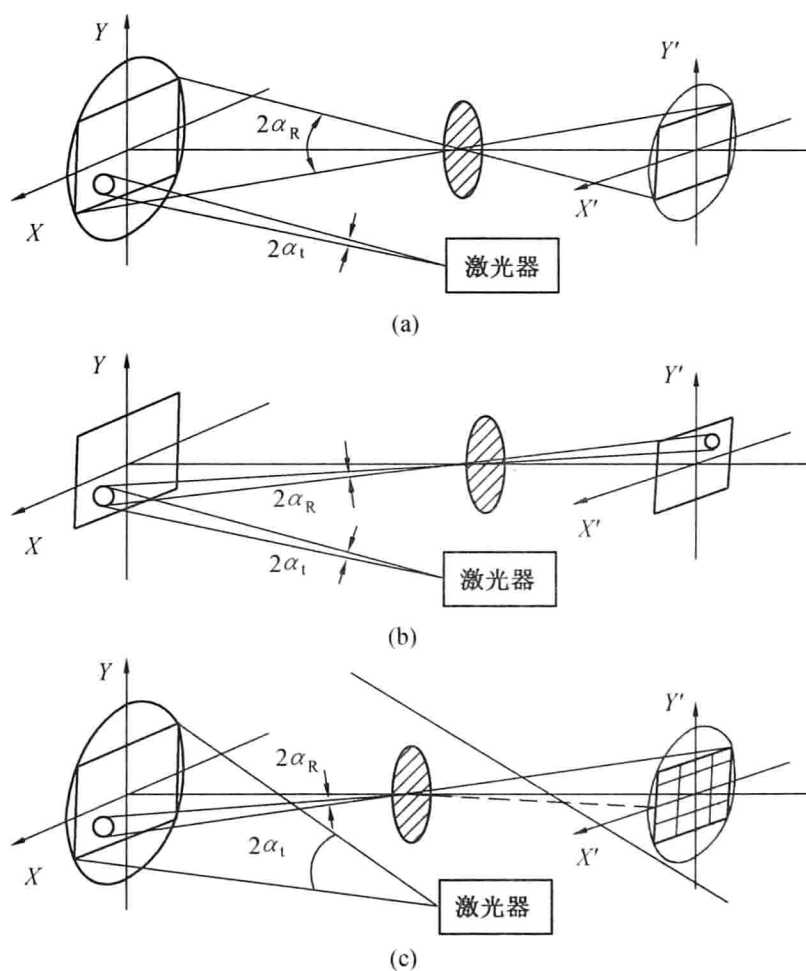


图 1.2 激光雷达系统的 3 种发射光束与接收视场方案示意图

1.1.2 激光器

激光器作为发射源是激光雷达的核心器件。激光器的种类很多,性能各异,究竟选择哪种激光器作为雷达辐射源,往往要对各种因素加以综合考虑,其中包括波长、大气传输特性、功率、信号形式、功率要求、平台限制(体积、质量和功耗)、对人眼安全程度、可靠性、成本和技术成熟程度等。从目前实际应用来看,Nd:YAG 固体激光器、CO₂ 气体激光器、

GaAlAs 半导体二极管激光器和掺铒光纤激光器等最具有代表性,激光雷达系统常用激光器的性能与特点,见表 1.2。

表 1.2 激光雷达系统常用激光器的性能与特点

序号	波长 / μm	激光器类型	连续功率 /W	脉冲能量 /J	脉冲重复 频率 /Hz	脉冲宽度 / μs
1	0.355	YAG 三倍频				
2	0.532	YAG 二倍频				
3	0.75	半导体	0.1	12 000		20
4	0.77 ~ 0.84	半导体激光器	10	200 000	100	200
5	0.808	半导体激光器		100	1 000	0.1
6	1.054	铷玻璃固体激光器	1 ~ 1 000	100	0.008	0.02
7	1.06	Nd:YAG 固体激光器		1 000	10 000	0.01
8	1.33 ~ 1.55	光纤激光器	0.01 ~ 1 000			0.01
9	1.94 ~ 2.1	TmHo:YLF		0.1 ~ 1	10 000	0.3
10	3 ~ 5	光参量激光器				0.3
11	9.0 ~ 11	CO ₂ 气体激光器	0.1 ~ 1 000	5 000	50 000	0.1

在激光雷达系统设计中,除了对激光器的发射功率(或脉冲能量)关心以外,设计者往往还特别关注以下指标参数。

1. 激光器的几何参数

(1) 光束截面函数

光束截面函数是指激光束内的光强在横截面积内的分布,在一般情况下,在不同矢量