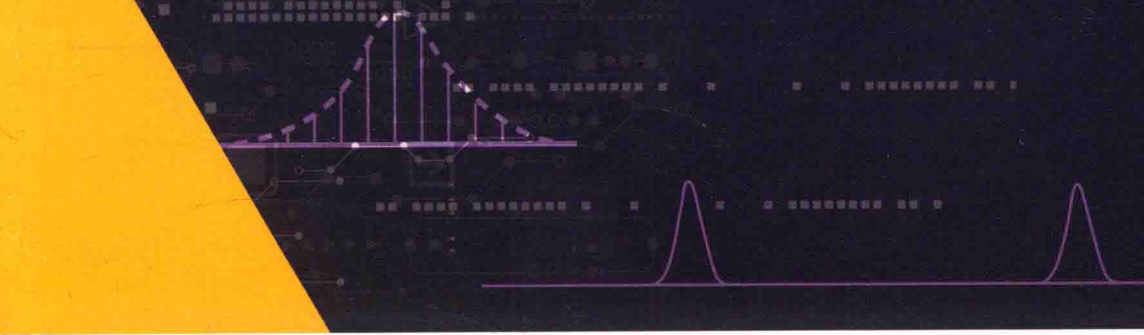




军队“2110工程”资助出版

现代脉冲激光测距技术

Modern Pulsed Laser Ranging Technology

周冰 黄富瑜 徐春梅◎编著



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

军队“2110工程”资助出版

现代脉冲激光测距技术

周 冰 黄富瑜 徐春梅 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书共分5章。第1章概要介绍激光及激光测距技术的主要类型及特点；第2章介绍经典脉冲激光测距原理及组成，主要包括脉冲激光测距技术的基本原理、激光发射机、激光接收机、应用和发展概况；第3章介绍高精度脉冲激光测距技术，主要分析了脉冲式激光测距系统的测距误差与激光光源的脉宽压缩和控制、精确脉冲到达时刻鉴别、精密时间间隔测量等技术的最新发展；第4章介绍超远程脉冲激光测距技术，包括超远程脉冲激光测距基本理论、单光子探测技术、微弱回波信号检测技术、基于事件计时器的时间间隔测量等；第5章介绍飞秒脉冲激光频率梳绝对距离测量，包括了飞秒光频梳测距技术发展概况、飞秒光频梳及其产生、光频梳绝对距离测量技术基础、飞秒光频梳测距方法、光梳多波长干涉测距的波长选择和相位信息提取方法等内容。

本书可供光学工程专业的研究生、本科生、高等学校教师、相关领域的工程师及从事此类仪器方案论证、研制管理的科研工作者阅读，也可供相关专业技术人员参考。

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

现代脉冲激光测距技术 / 周冰, 黄富瑜, 徐春梅编著. —北京: 电子工业出版社, 2016.12

ISBN 978-7-121-30344-9

I. ①现… II. ①周… ②黄… ③徐… III. ①激光测距 IV. ①P225.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 273098 号

策划编辑: 王昭松

责任编辑: 郝黎明

印 刷: 三河市鑫金马印装有限公司

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: 720×1000 1/16 印张: 16 字数: 372 千字

版 次: 2016 年 12 月第 1 版

印 次: 2016 年 12 月第 1 次印刷

定 价: 78.00 元

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, 88258888。

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

本书咨询联系方式: wangzs@phei.com.cn。

前 言

编者从事军用光电技术与装备的教学和科研工作近 20 年,在此期间,日渐深感光电技术对现代科技、武器装备,乃至战争带来的深刻影响和巨大变革,而激光技术无疑是在所有军用光电技术中一颗最为耀眼的明珠,除被广泛用于激光测距、激光雷达与激光跟踪、激光通信、激光制导、激光陀螺和激光武器等军事用途外,还在工业、医疗等高科技领域全方位地改变着人们的生活。

脉冲激光测距是激光技术在军事上最早的一个应用领域,经过几十年的发展,其理论、技术、仪器等各方面均已发展的相对成熟和完备,这也是本书选题之初的压力所在。但任何科学技术都有一个不断发展和进步的过程,在编者多年的工作实践中,切实体会到了脉冲激光测距技术这些年来在如何提高测距精度、如何增大测距量程,以及现代飞秒脉冲激光频率梳绝对距离测量等技术的最新发展,但专门全面介绍这些技术及其最新进展的书籍还不多。毫无疑问,该专业领域的科技人员和青年学者迫切需要这些方面的知识;长期在工程技术第一线的同行也需要知识的更新;而那些从事相关专业工作和研究的技术人员也没有更多时间浏览众多文献,以掌握技术发展动态。遂冒昧将编者多年来在相关领域的技术总结编撰出版,以期受到本领域教学和科研技术人员的首肯。

本书在内容编写上力图做到以下几点。

(1) 重点突出。无论是经典的脉冲激光测距技术,还是最新的几个技术发展方向,每一个领域的技术重点都无一遗漏地进行了阐述。例如,经典脉冲激光测距技术的光源、发射系统、接收系统和信号处理环节;高精度脉冲激光测距技术的光源脉宽控制、高精度时刻鉴别和精密时间间隔测量;超远程脉冲激光测距技术的单光子探测和基于事件计时器的时间间隔测量;飞秒脉冲激光频率梳绝对距离测量的理论基础、测距方法、波长选择和信息提取等。

(2) 结构完整。从全书内容编排上看,高精度和超远程脉冲激光测距技术是对传统脉冲激光测距技术局限的改进和完善,故在介绍高精度和超远程脉冲激光测距技术之前,完整地介绍了经典脉冲激光测距原理及组成。各章节内,除介绍各自技术重点外,与之相关的问题来源、技术背景、发展现状等也相应做了介绍,使各章节内的内容结构也相对完整。例如,高精度脉冲激光测距技术中的测距误

差分析,超远程脉冲激光测距技术中的超远程测距基本理论,飞秒脉冲激光频率梳绝对距离测量中的发展概况等内容。

(3) 尽力呈现最新技术发展。所有素材虽然是编者多年来持续积累的结晶,但在选取上尽量能够展示相关技术领域的最新研究成果。例如,高精度脉冲激光测距技术中的激光光源脉宽控制技术,飞秒脉冲激光频率梳绝对距离测量中的内容更是最近一两年才发布的研究成果。

但“求其上者得其中”,虽然在素材选取、内容确定上编者已倾尽全力,但是否做到了以上几点,仁者见仁、智者见智,还需读者进行评判。

本书共 5 章。在系统介绍经典脉冲激光测距原理及组成的基础上,重点介绍脉冲激光测距技术在高精度测距、超远程测距、飞秒脉冲激光频率梳绝对距离测量 3 个方向的最新发展。各章节之间内容虽相对独立,但每个技术方向的内容结构完整、重点突出。可以说本书是对传统脉冲激光测距技术如何提高测距精度、如何增大测距量程,以及飞秒脉冲激光频率梳绝对距离测量等最新脉冲激光测距技术的一个系统梳理和总结。可帮助相关专业学生了解脉冲激光测距技术的发展前沿动态,也是相关科研人员从事激光测距机设计、研发非常有益的技术参考资料。

本书由军械工程学院电子与光学工程系周冰、黄富瑜、徐春梅编著。其中周冰对全书内容进行了规划和选定,并负责了第 1、3、5 章的编写;第 2 章由周冰、徐春梅共同编写;第 4 章由黄富瑜编写;周冰对全书进行了统稿和校正。全书由军械工程学院电子与光学工程系沈学举教授主审。

本书在内容选定过程中,参考了国内外相关领域的大量研究文献,在此特别对原文献作者在相关领域所作的开创性研究成果表示敬意和感谢。

感谢沈学举教授、张雏副教授在相关内容编写过程中给予的热心指导和帮助;感谢研究生高宇辰在前期资料整理过程中的辛勤付出;感谢军械工程学院各级领导的培养、教育与关怀。本书的出版受到军队“2110 工程”资助,在此一并表示感谢。

由于作者学术视野和水平所限,加之出版时间仓促,本书在行文上还略显粗糙,在内容上也有不妥、遗漏、偏颇之处,恳请业内前辈、技术同行不吝斧正。

编著者

2016 年 9 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 激光的特点及应用	1
1.1.1 激光的产生及特点	1
1.1.2 激光的应用	3
1.2 经典的激光绝对距离测量方法	13
1.2.1 激光非干涉测距方法	13
1.2.2 激光干涉测距方法	15
1.3 脉冲激光测距技术发展	17
1.3.1 脉冲激光测距机发展概况	17
1.3.2 脉冲激光测距技术研究的新方向	19
参考文献	20
第 2 章 经典脉冲激光测距原理及组成	21
2.1 基本原理	21
2.1.1 测距原理和组成	21
2.1.2 测距方程	22
2.1.3 最大可测距离和测距精度	24
2.1.4 消光试验	26
2.2 激光发射机	26
2.2.1 军用激光测距机可选用的激光器	26
2.2.2 固体激光器	27
2.2.3 全固态激光技术	33
2.2.4 人眼安全的固体激光器	34
2.2.5 喇曼激光器	38
2.2.6 气体激光器	42
2.2.7 半导体激光器	44

2.3 激光接收机	46
2.3.1 直接探测激光接收机	46
2.3.2 外差探测激光接收机	52
2.3.3 背景噪声	53
2.3.4 光电探测器	56
2.3.5 信号的分辨	64
2.4 应用和发展概况	67
2.4.1 发展概况	67
2.4.2 装备和研制现况	68
2.4.3 新一代军用激光测距机的研制	69
参考文献	72
第3章 高精度脉冲激光测距技术	73
3.1 脉冲式激光测距系统的误差分析	73
3.1.1 系统误差	73
3.1.2 随机误差	75
3.1.3 脉冲激光测距系统的总误差	78
3.2 激光光源的脉宽压缩和控制	78
3.2.1 调Q激光器脉宽压缩	78
3.2.2 光纤激光器的脉宽压缩技术	94
3.2.3 半导体激光器的脉宽控制	102
3.3 精确脉冲到达时刻鉴别	104
3.3.1 脉冲前沿鉴别及其改进	105
3.3.2 恒定比值时刻鉴别及其改进	107
3.3.3 过零时刻鉴别及其改进	110
3.4 精密时间间隔测量	114
3.4.1 脉冲计数法的测量误差	114
3.4.2 时间放大测量	114
3.4.3 计数器及计数方法的改进	118
3.4.4 基于数字移相等效时钟的时间间隔测量及实现	125
3.4.5 游标卡尺测量技术	130
3.4.6 时间间隔的内插测量	133
3.4.7 时间间隔的“粗”“细”组合测量	144
参考文献	148

第4章 超远程脉冲激光测距技术	151
4.1 引言	151
4.2 超远程脉冲激光测距基本理论	151
4.2.1 实现原理与系统结构	151
4.2.2 激光测距方程	154
4.2.3 光子探测概率方程	155
4.3 单光子探测技术	156
4.3.1 APD 工作模式与单光子计数原理	156
4.3.2 GM-APD 雪崩抑制技术	158
4.3.3 GM-APD 单光子探测器性能参数	162
4.4 微弱回波信号检测技术	165
4.4.1 信号积累技术	165
4.4.2 匹配滤波技术	167
4.4.3 相关检测技术	169
4.4.4 高阶统计检测技术	171
4.4.5 虚警抑制	172
4.5 基于事件计时器的时间间隔测量	174
4.5.1 事件计时器原理	174
4.5.2 A032-ET 计时器	176
参考文献	178
第5章 飞秒脉冲激光频率梳绝对距离测量	181
5.1 概述	181
5.1.1 光学频率梳绝对距离测量技术需求背景	181
5.1.2 传统激光测距方法的局限	183
5.1.3 飞秒光频梳测距技术发展概况	184
5.1.4 光频梳测距技术研究中的关键问题	189
5.2 飞秒光频梳及其产生	191
5.2.1 光学频率梳	191
5.2.2 光频梳的产生	194
5.3 光频梳绝对距离测量技术基础	197
5.3.1 多波长干涉测距及其合成波长	197
5.3.2 合成波长干涉测量的级间过渡条件和逐级精化理论	203

5.3.3 合成波长测距的误差分析	206
5.4 飞秒光频梳测距方法	208
5.4.1 频率梳齿间干涉相位测距法	208
5.4.2 脉冲飞行时间与互相关干涉联合测距法	211
5.4.3 频率梳光谱分辨干涉测距法	214
5.4.4 参考光学频率梳的多波长干涉测距法	216
5.4.5 TOF、MWI 和 SRI 组合测量测距法	218
5.4.6 双飞秒频率梳外差测量	221
5.4.7 双光梳多外差绝对测距方法	223
5.4.8 基于外差双光学频率梳的多波长干涉测距方法	232
5.5 光梳多波长干涉测距的波长选择和相位信息提取方法	238
5.5.1 光梳多波长绝对测距的波长选择	238
5.5.2 多波长干涉测距相位信息提取方法	243
参考文献	246

第 1 章

绪 论

1.1 激光的特点及应用

1.1.1 激光的产生及特点

1. 激光的产生

Laser (激光) 是 Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (受激辐射放大) 的首字母缩写, 又译为镭射、雷射。它是指通过受激辐射放大和必要的反馈, 产生准直、单色、相干的光束的过程及仪器。

1916 年, 爱因斯坦根据物质发光和吸收必须符合能量守恒的基本原则, 预言除了大量的自发辐射以外还必然存在着少量的受激辐射, 并且这种受激辐射还会进一步引发同类的受激辐射, 因此可以获得受激辐射被增强的效应。爱因斯坦的论断为激光的发明提供了理论基础。

自爱因斯坦提出受激辐射概念之后, 直到 1958 年, 美国两位微波领域的科学家汤斯 (C. H. Townes) 和肖洛 (A. I. Schawlow) 发表了著名论文《红外与光学激射器》, 指出了受激辐射为主的发光的可能性, 以及必要条件是实现“粒子数反转”。他们的论文开辟了崭新的激光研究领域。1960 年 5 月 15 日美国加州休斯实验室的梅曼 (T. H. Maiman) 研制成了世界上第一台红宝石激光器, 获得了波长为 694.3nm 的激光。

不同类型和特点的激光器基本结构一般包括 3 个部分, 即激光工作介质、激励源 (也称为泵浦源) 和谐振腔, 如图 1-1 所示。

(1) 激光工作介质。激光的产生必须选择合适的工作介质, 可以是气体、液体、固体或者半导体。在这种介质中可以实现粒子

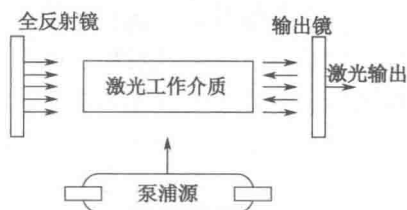


图 1-1 激光器基本结构示意图

数反转,以制造获得激光的必要条件。亚稳态能级的存在,对实现粒子数反转是非常有利的。现有激光工作介质有近千种,可产生的激光波长包括从真空紫外到远红外,非常广泛。激光工作介质也称为激活介质。

(2) 激励源(泵浦源)。为了使工作介质中出现粒子数反转,必须用一定的方法去激励原子体系,使处于上能级的粒子数增加。一般可以用气体放电的办法利用具有动能的电子去激发介质原子,称为电激励;也可以用脉冲光源来照射工作介质,称为光激励;还有热激励、化学激励等。各种激励方式被形象化的称为泵浦或抽运。为了不断得到激光输出,必须不断的“泵浦”以维持处于上能级的粒子数比下能级多。

(3) 谐振腔。有了合适的工作介质和激励源后,可实现粒子数反转,但这样产生的受激辐射强度很弱,无法得到实际应用。于是人们就想到了用光学谐振腔进行放大。所谓光学谐振腔,实际上就是在激光器两端,面对面装上两块反射率很高的镜子。一块几乎全反射,另一块光大部分反射、少量透射出去,以使激光可透过这块镜子而射出。被反射回到工作介质的光,继续诱发新的受激辐射,光被放大。因此,光在谐振腔中来回振荡,形成连锁反应,雪崩似的获得放大,产生强烈的激光,从部分反射镜子一端输出。

2. 激光的特点

通过激光的产生原理可以看到,普通常见光源的发光(如电灯、火焰、太阳等)是由于介质在受到外来能量(如光能、电能、热能等)作用时,原子中的电子就会吸收外来能量从低能级跃迁到高能级,即原子被激发。激发的过程是一个“受激吸收”过程。

如果某种材料在原子中存在亚稳态能量级,在外加光的诱发和刺激下可以使电子迅速跃迁到低能级,并放出光子,称为受激辐射。这种受激辐射的光子有显著的特点,就是光子的频率(能量)相同,而且发射方向、偏振方向及光波的相位都完全一样,这就是激光。

也就是说,普通光源的发光,是电子从低能级跃迁到高能级,是受激吸收和自发辐射;激光的产生,是电子从亚稳态能量级跃迁到低能量级,是由于受激辐射和光的放大。因此激光与普通光相比,具备以下四大特性。

(1) 方向性好。普通光源(如太阳、白炽灯或荧光灯)向四面八方发光,而激光的发光方向可以限制在小于几个毫弧度立体角内,这就使得在照射方向上的照度提高千万倍。激光准直、导向和测距就是利用方向性好这一特性。

(2) 亮度高。激光是当代最亮的光源,只有氢弹爆炸瞬间强烈的闪光才能与它相比拟。太阳光亮度大约是 $10^3 \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$,而一台大功率激光器的输出光亮度比太阳光高出 $7 \sim 14$ 个数量级。因此,尽管激光的总能量并不很大,但由于能量高度集中,很容易在某一微小点处产生高压和几万摄氏度甚至几百万

摄氏度高温。激光打孔、切割、焊接、激光外科手术乃至激光武器就是利用了这一特性。

(3) 单色性好。光是一种电磁波,光的颜色取决于它的波长。普通光源发出的光通常包含着各种波长,是各种颜色光的混合。太阳光包含红、橙、黄、绿、青、蓝、紫 7 种颜色的可见光及红外光、紫外光等不可见光。而某种激光的波长,只集中在十分窄的光谱波段或频率范围内,如氦氖激光的波长为 632.8nm ,其波长变化范围不到万分之一纳米。由于激光的单色性好,因此为精密仪器测量和激励某些化学反应等科学实验提供了极为有利的手段。

(4) 相干性好。干涉是波动现象的一种属性。基于激光具有方向性和单色性好的特性,它必然相干性极好。激光的这一特性使全息照相和相干探测成为现实。

1.1.2 激光的应用

激光以它独特的单色性、相干性和方向性加上由此而来的超高亮度、超短脉冲,给科学和技术带来了深刻的影响。激光的频率抖动可优于 10^{-15} ,比普通单色光源好 9 个量级;激光束的发散角可小于 0.2 mrad (若辅以光学系统扩束,其发散角还可再减小),比最好的探照灯光束发散角还小约两个量级,这两点使它表现了极好的时间相干性和空间相干性。况且,激光器输出的光子流密度可达 $3 \times 10^{19} \sim 10^{25}$ 光子 $\cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,相当于 $0.1 \sim 10^5 \text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。若引入聚焦光学系统,最高可放大 10^7 倍。

激光的重大意义首先表现在军事应用方面。作为最早的军用激光装备,激光测距机已批量装备部队,迅速、准确地测定目标距离;它被引入到火控系统中,极大地提高了武器的首发命中率。激光制导武器的高精度,使之在炮弹、航空炸弹、地空导弹、反坦克武器中表现了极强的生命力。激光通信容量大、保密性好、抗干扰力强,已成为自动化指挥系统的重要组成部分;机载、星载的激光通信系统和对潜艇的激光通信正在快速发展。激光陀螺的大动态范围、高灵敏度和高可靠性,使之在飞机、舰艇和导弹导航中有广阔的应用前景。激光雷达可以准确测距、测速,具有普通雷达不可替代的优点。激光全息和激光存储技术为特定军事目标辨识和定位提供高实时性的新手段。激光大屏幕显示具有亮度高、分辨力好的优点,可用于战况展示。激光模拟训练器成本低廉、效果逼真,已广泛用于射击训练和作战演习。激光还可用于非致命武器,使敌光电传感器失效或人眼致眩、致盲。高能激光武器甚至可以直接摧毁敌飞机、军舰、洲际导弹乃至卫星。

激光核聚变技术利用高功率激光轰击氘、氚微粒,研究在惯性约束条件下发生核聚变的物理过程(即模拟氢弹爆炸过程),是发展核武器的重要方法。利用激光分离同位素比传统方法效率高,已投入试生产。激光加工、激光检测、激光医疗等都已取得显著成效并在飞速发展。为满足武器应用的要求,将重点发展近红外、可见

光、紫外和软 X 射线等波段的高功率激光器 (含波长可调的器件), 同时将深入研究激光对各种材料和光电传感器的破坏机理、激光的大气传输特性及波面畸变的探测校正技术、精密跟踪技术。激光技术与微电子技术将更紧密结合, 以实现武器装备的灵巧化、智能化。为适应战场烟尘环境和大气条件, $10.6\ \mu\text{m}$ 和 $1.54\ \mu\text{m}$ 波长的激光器及其探测技术会有长足进步。为适应海水传输, $0.48\sim 0.54\ \mu\text{m}$ 波段的蓝绿光激光器及可调谐窄带光滤技术会有新的突破。战术和战略激光武器将走向实用, 成为一类重要的新型定向能武器。

1. 激光测距技术

激光测距技术是最成熟的军用激光技术, 激光测距机是激光装备家族中的元老, 早在 20 世纪 60 年代中期就已在部队服役。激光测距与一般光学测距相比, 具有操作方便、系统简单和昼夜可用的优点。与雷达测距相比, 又表现了抗干扰力强和精度高的特色。激光的频率比微波高得多, 以小尺寸的发射天线就能发射极窄的波束, 如直径 $76\ \text{mm}$ 的天线就能发射束散角约 $1\ \text{mrad}$ 的红宝石激光; 而发射微波时, 若要得到 $1\ \text{mrad}$ 的束散角, 天线直径就要大于 $305\ \text{m}$ 。这种情况又使激光测距机小而轻便。激光脉冲可以很窄, 故易于精确探测目标的距离, 激光优良的方向性使之在测量目标时不易受其他物体的影响。

激光测距是主动式工作, 因而容易暴露和被敌方探测。同时, 可能受敌方延迟转发式信号欺骗而得到错误结果。相对于普通光学被动式测距而言, 这是一大缺陷。相对于雷达测距而言, 其突出缺点是受气候条件影响很大。

在 1982 年 6 月的黎巴嫩战争中, 为从远处攻击叙利亚坦克, 以色列把“陶”式导弹装在反坦克直升机上投放, 其中 118 枚借助激光测距有 99 枚命中叙坦克, 19 枚出现技术故障; 而另 19 枚就是因为用未装激光测距机的直升机投放, 导弹射得太远而白费。

激光测距有脉冲式和连续波式两种体制。目前军用激光测距机以前者为多, 且绝大多数采用固体激光器。1961 年, 美国休斯飞机公司研制的世界上第一台激光测距机, 系采用单脉冲红宝石激光器 (波长为 $694.3\ \text{nm}$)。而如今, 最常见的激光测距机是用 Nd:YAG 激光器或钕玻璃激光器 (波长 $1.064\ \mu\text{m}$)。

2. 激光雷达与激光跟踪技术

激光雷达是以激光波束为信息载体的雷达。它不仅可精确测距, 而且能精确测速、精确跟踪。继无线电雷达、超高频雷达、微波雷达之后, 激光雷达把辐射源的频率提高到光频段, 比毫米波高出 $2\sim 4$ 个数量级。这使之能探测迄今所碰到的任意微小的自然目标, 包括极细的导线和发射的粒子。例如, 为控制两飞船对接, 必须精确测量二者的相对位置及速度。地面无线电雷达难以胜任, 微波雷达精度又不够。而用平均功率为几十瓦的空间船载激光雷达就可以, 它能对远在一

万多公里外的飞船做精确探测。

探测辐射回波的多普勒频移,可感知目标的小量振动。由于这种频移正比于载波频率,因此激光雷达探测微小振动的灵敏度比典型的毫米波雷达高2~3个量级。这对目标识别非常有利。

激光雷达的带宽比毫米波雷达小2~3个量级,加之它的高空间分辨率及上述高灵敏度,使使用者可以获取目标尺寸、形状、速度、振动及旋转速度等多种信息,实现对其准确识别和跟踪。

激光优异的单色性和极小的脉冲宽度使激光雷达能排除背景和地面杂波干扰,减小噪声影响,因而能探测超低空目标,可用于跟踪发射初始段的导弹和巡航导弹,如洲际导弹,若它释放大量电磁假目标,或借助小型核爆炸构成人为的反射微波电离层,就足以使微波雷达失效。但这些对激光雷达影响较小。

目前一般超远程雷达提供的预警时间(从发现目标到击中它所需时间)约15分钟,即使是超视距雷达(能发现地平线以下、直线视距以外的目标)也不会超过30分钟。而实战中对目标粗跟踪和精跟踪就要十多分钟,留给引导拦截导弹的时间就会不够。而配备激光雷达的反导系统却可赢得更多预警时间,可对付分导式多弹头。

另外,激光雷达尺寸比微波雷达小得多。例如,从地球照射月球上 1km^2 区域,激光雷达天线直径约30cm,而微波天线直径约需几千米(目前还造不出这么大的可转动天线)。这使激光雷达更适于车载、机载和用于空间载体。

激光雷达的缺点是:大气对激光的散射和吸收比微波严重,尤其是有云、雾、雨时,激光雷达作用距离小。另外,由于激光束散角小,大面积搜索时容易丢失目标,因此不宜作搜索雷达。应与微波雷达结合使用,以扬长避短。

3. 激光通信

图1-2所示为激光语音通信的原理和系统组成。发话器送出的语音信号经过电信号发送器变成电信号,由编码器编码后加至调制器;调制器按编码电信号的规律对来自激光器的稳定激光束实施调制,使光束随语音的变化而变化(即光载波承载了语音信号);光发射机(天线)把这种光信号发送出去;异地的光接收机对准发射方向接收光信号,并把它汇集于光探测器,转变为电信号;经由解码器解码后通往电信号接收器,还原为语音信号由受话器放出。

目前光通信多采用半导体激光器。这是因为它效率高、寿命长、重量轻、体积小、易调制。其次是YAG激光器和 CO_2 激光器。

至于光调制方法,可用直接调制、电光调制、磁光调制等。例如,把电信号直接加在半导体激光器上就实现直接调制(GaAs 双异质结激光器的直接调制频率可达 10^9Hz ,已足够目前应用)。若把电信号加于电光晶体,同时令光通过该晶体,即可实现电光调制(调制频率可达几千兆赫兹)。对铁石、榴石等晶体施加磁场,

可做磁光调制。

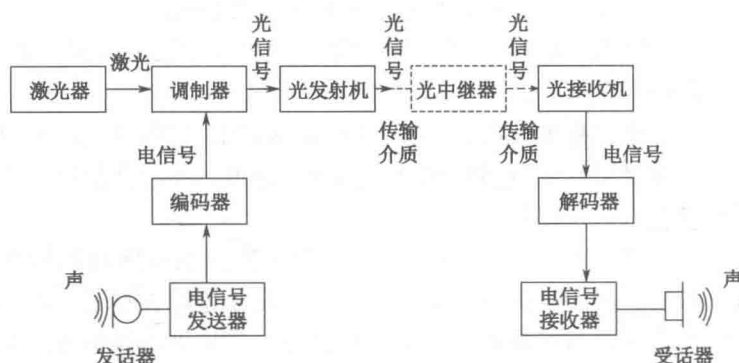


图 1-2 激光语音通信的原理和系统组成

至于光接收机中的探测器，目前多用光电二极管。例如，在可见光波段可用硅光管；在近红外波段用 PIN 或 APD；中、远红外波段分别用 InAs 和 HgCdTe 二极管。其中 APD 的响应速度可达 130ps 且有较大的电流放大作用，有利于提高信噪比，适用于远程大容量通信的情况。

光通信系统中的中继器，是为弥补光信号传送中的衰减损耗（如介质吸收、散射）和失真（如色散）而设置的，以便在一定的距离上对光信号做放大、整形等技术处理，以保证信号质量。

通信光束可在大气、光纤、太空和水中传播，人们分别称为大气激光通信、光纤激光通信、空间激光通信和水下激光通信。

军事应用是激光通信发展的重要牵引力。现在，激光通信已在军事上得到广泛应用。例如，指挥所与前沿阵地、岛屿之间、大河两岸、作战平台之间，采用光纤通信就十分合适。而在远程控制（如远程导弹控制）、空间技术（如人造卫星通信、飞船通信）等方面，激光大气通信就有突出的优点。

保密和抗干扰是现代高技术战争中通信手段必备和首要的条件，激光通信以优良的保密性和抗干扰性能而受军界重视。以半导体激光器为辐射源的大气激光通信，其载波光束发散角可被控制到毫弧量级，传至几千米处对应的光斑直径不过几米，不易被敌方截获。另外，因为载波是不可见的红外光，又增强了其隐蔽性。若应用光纤的波导作用，还可排除窃听、信息泄露的危险。由于普通电磁干扰对光频信号无效，而光频干扰又易于屏蔽，因此激光通信的抗干扰能力很强。

另外，载波光束的优异方向性（发散角小）不仅提高了保密性，还大大增强了到达接收端的光能密度，有利于正确探测和减小接收机体积、重量及功耗。现已实用的便携式激光电话，形似小型双目望远镜，瞄准对方即可通话；还有装在头盔上的激光电话，使用更加方便。光波的极高频率不仅大大丰富了频率资源，提供很高的数据传输速率，满足大容量军用信息传输需要，还为天/地一体化信

息获取和完成空间多功能任务提供了时间保障和根本性的优势。

4. 激光制导技术

以激光为信息载体,把导弹、炮弹或炸弹引向目标而实施精确打击的技术称为激光制导。

在 20 世纪六七十年代的越南战场,美军曾为轰炸越南首都河内附近的清化桥先后出动 600 余架次的飞机,投弹达几千吨,还付出毁机 18 架的沉重代价,仍未能遂其愿。1965 年,美空军资助德克萨斯仪器公司把普通炸弹改装为“宝石路”激光制导炸弹,并于 1968 年在越南战场首次使用,其效果令人震惊:在两小时内发射 20 枚就摧毁了 17 座桥梁,清化桥也未能幸免,且美飞机无一损失。这就是最早出现的激光制导武器及其显示的非凡战绩。由此引发了激光制导研究热潮。

20 世纪 70 年代后期出现的激光制导导弹,使国际上的激光制导研究进一步升温。美国的“Maverick”空地导弹和法国 AS-30L 空地导弹是其中的典型代表。

1980 年,美国开始生产“铜斑蛇”激光制导炮弹,用 155 mm 口径的榴弹炮发射。射程 12~20 km,圆概率误差在 0.3~1 m 内,命中概率为 80%~90%,1~2 发即可击毁一辆坦克,相当于约 300 发常规炮弹。

激光制导用于反坦克武器,出现了所谓“第三代”反坦克导弹。其中,美国的“海尔法”反坦克导弹可算是一个代表。自 1985 年始,它大量装备部队。这是一种“半主动”形式的寻的导弹。

瑞典从 1977 年开始批量生产 RBS-70 便携式地空激光驾束制导导弹。其命中概率极高,是防低空飞机的优良武器。后又被安装在直升飞机上,作为自卫性武器。

美国研制的低空激光制导炸弹 LLLGB,能在很低的高度和超远程距离上投放。1986 年已成功完成作战试验和鉴定,性能优良。当时,从 F-14 和 F-111 飞机上投放 47 枚,其中 44 枚命中目标。

激光制导炮弹使火炮长期存在的远程射击首发命中率不高的难题迎刃而解,被认为是野战炮兵的一大进步。此外,激光制导炮弹对火炮本身的发射精度要求不高,只要把弹丸大致射向目标的前上方,弹上寻标器即可自行搜索和跟踪目标。而且,一旦把弹发射出去,射手和炮就可撤离,避免遭受敌方反击火力的攻击。命中精度的提高不仅大大减少了作战投入的火炮数量及弹药的消耗,还能在远距离给敌方坦克之类的重要作战平台以突然的精确打击,压制其锐气和战斗力,给反坦克部队提供有效的纵深支援。同时也大大减轻后勤保障的压力,便于部队灵活机动。

机载激光制导武器的应用使载机和飞行员的战场生存能力极大提高。一般使用无线电制导武器时,需要借助望远镜或瞄准具使弹丸保持在瞄准线上。为此,飞机在实施攻击时,必须尽可能地俯冲逼近目标。这时,面对地面的防空火力,

飞机和驾驶员可能招致杀身之祸。而激光导引头有大视场扫描搜索功能，不要求载机向目标作大角度俯冲，使飞机和人员更加安全。

激光制导武器有良好的抗干扰能力。因为任何自然物体都不可能辐射激光，故对激光制导武器而言，不存在自然干扰。这是它优于红外制导武器的绝妙之处。

激光制导炮弹的成本约为普通炮弹的 5 倍，而效率比约为普通炮弹的 40 倍。

激光制导武器的最大缺点是受气候条件制约，不能全天候、全时日地使用。

激光制导有“寻的式”和“视线式”两类。当前，“寻的式”是指半主动激光制导（主动式寻的器方案已有报道，但还未形成武器装备）；而“视线式”又有激光驾束制导和激光视线指令制导之分。

（1）半主动式激光制导。以弹外专用编码激光束照射目标，而弹上激光寻的器利用从目标漫反射的激光，实现对弹的自动控制和目标的跟踪，使弹飞向目标实施打击，这就是半主动式激光制导。这里的“弹”可能是导弹、炮弹或炸弹。

由于携带目标信息的激光束是己方特意向目标发射的，因此有“主动”的意义。同时，这种“主动”不是弹自身的行为，而是由另外的专用装置实施，故冠以“半”字，以区别于“主动式”寻的方式。若照射目标的激光束是由弹上发射，使目标指示器与寻的器集成于弹内，就构成“主动式”寻的。尽管报道过用弹上 YAG 激光器、CO₂ 激光器、半导体激光器等照射目标的方案，但却未见形成实际装备的主动式激光制导武器。这一方面是因为这种方式本身的技术难度较高，也可能被红外被动成像制导所表现的明显优势所影响。

“半”主动式激光制导是目前一类很重要的制导武器，其优点是制导精度很高，抗干扰能力强，结构简单，成本较低，能对付多个目标，容易实现通用模块化等。其缺点主要表现在：目前使用的激光波长种类太少，容易被敌方侦测和对抗；同时，由于需要对目标实施主动照明，增加了被敌发现的概率；另外，它受气象条件限制，影响实用性。

（2）驾束式激光制导。与上述“寻的式”激光制导武器不同，驾束式激光制导属于“视线式”制导范畴，目前主要用于地面防空和地对地作战。无论是型号、品种还是装备的数量，它都不如“半主动”式激光制导武器多。

驾束式激光制导系统需要一个跟踪瞄准具和激光投射器，前者保持对目标的跟踪和瞄准，后者则不断向目标（或预测的前置点）发射经过调制编码的激光束。调制使光束在横截面内的强度分布成为点在该面上所处方位的函数。制导飞弹沿瞄准线（瞄准镜入瞳中心与目标的连线）发射并被笼罩于编码激光束中，弹尾的激光接收机从上述调制光束感知弹相对于光束中心线的方位，经过弹上计算机解算和电信号处理，转换成修正飞行方向的控制信号，使弹沿着瞄准线飞行。因为瞄准线（与激光束的中心线重合）一直指向目标，所以飞弹总趋于沿瞄准线前进。一旦偏离，则弹上产生误差信号控制舵翼进行修正。目标运动时，只要瞄准具保持对目标的精确跟踪，则调制激光束就“咬”住它不放，飞弹就能击中目标。