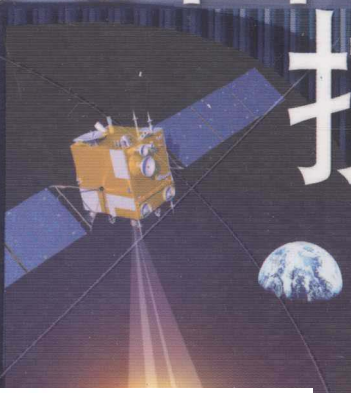


雷达技术丛书
<http://www.phei.com.cn>

“十一五”国家重点图书出版规划项目

激光雷达 技术 (下册)



各种电子书 随书光盘等 欢迎咨询

戴永江 编著

Q群: 75490529 (图书定制)

淘宝: <http://shop108402496.taobao.com/>

各种电子书 随书光盘等 欢迎咨询

Q群: 75490529 (图书定制)

淘宝: <http://shop108402496.taobao.com/>



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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)》

各种电子书 随书光盘等 欢迎咨询

Q群: 75490529 (图书定制)

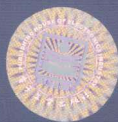
淘宝: <http://shop108402496.taobao.com/>



策划编辑: 刘宪兰

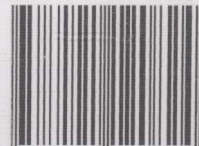
责任编辑: 刘真平

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（下册）

戴永江 编著

各种电子书 随书光盘等 欢迎咨询

Q群：75490529（图书定制）

淘宝：<http://shop108402496.taobao.com/>

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.下册/戴永江编著.一北京: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207893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:31.25 字数:548千字

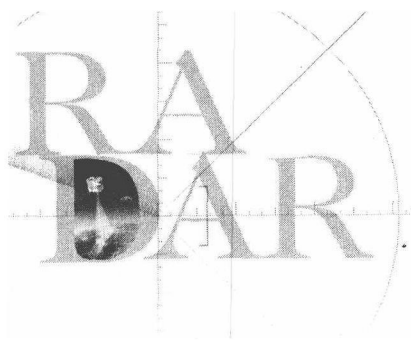
印 次:2010年11月第1次印刷

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及制造工艺，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一个心愿,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

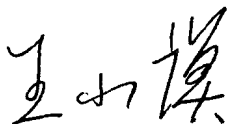
要读取其中一册或数册。希望此次出版的“丛书”能对从事雷达设计、制造的工程技术人员，雷达部队的干部、战士和高校电子工程专业及相关专业的师生有所帮助。

“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！

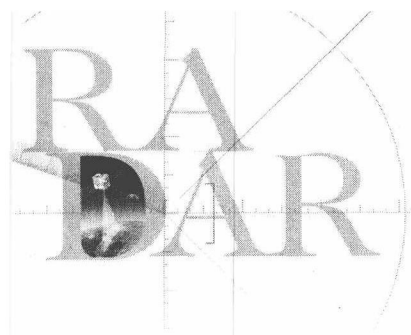
“丛书”的出版，得到了中国电子科技集团公司、电子科学研究院、南京电子技术研究所、华东电子工程研究所等各参与单位领导的大力支持，得到了电子工业出版社领导和参与编辑们的积极推动，得到了“丛书”编辑部各同志的热情帮助，借此机会，一并表示衷心的感谢！

中国工程院院士

中国电子科技集团公司科技委副主任



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新兴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(下册)

第 11 章 搜索和跟踪	(487)
11.1 概论	(488)
11.1.1 地位和作用	(488)
11.1.2 基本内容及特性	(490)
11.2 搜索与跟踪系统特性	(493)
11.2.1 基本作用距离方程	(493)
11.2.2 系统的基本参数	(494)
11.2.3 系统信噪比	(498)
11.3 搜索与跟踪系统	(498)
11.3.1 系统基本要求	(498)
11.3.2 光机扫描装置	(499)
11.3.3 温度传感器	(510)
11.3.4 搜索与跟踪系统的结构	(511)
11.3.5 搜索与跟踪系统设计	(513)
11.3.6 遥感系统	(515)
11.4 成像搜索与跟踪技术	(517)
11.4.1 概述	(517)
11.4.2 组成结构	(518)
11.4.3 图像信号处理系统的基本要求	(518)
11.4.4 成像搜索与跟踪系统设计	(520)
11.5 多目标探测、识别与跟踪	(525)
参考文献	(527)
第 12 章 建模与仿真	(529)
12.1 基本概念	(530)

12.1.1	基本概念和分类	(530)
12.1.2	主要数学工具	(535)
12.2	应用与发展前景	(539)
12.2.1	系统工程分析的应用	(539)
12.2.2	系统使用训练和培训中应用	(539)
12.2.3	系统研发、设计和试制中应用	(544)
12.2.4	计算机集成制造系统的应用	(546)
12.2.5	发展方向和趋势	(547)
12.3	激光雷达建模与仿真	(548)
12.3.1	激光雷达虚拟制造系统	(548)
12.3.2	激光雷达应用背景的半实物仿真	(551)
12.3.3	激光雷达目标光学特性的建模与仿真	(552)
12.3.4	激光雷达系统光学收发天线的计算机辅助设计	(555)
12.3.5	激光雷达系统功能的建模与仿真	(567)
	参考文献	(574)
第 13 章	激光雷达系统	(577)
13.1	测距跟踪激光雷达	(578)
13.1.1	基本原理	(578)
13.1.2	基本性能参数	(580)
13.1.3	脉冲测距激光雷达	(583)
13.1.4	连续波测距激光雷达	(586)
13.1.5	单脉冲跟踪激光雷达	(589)
13.1.6	CO ₂ 相干测距跟踪激光雷达	(592)
13.1.7	星载激光雷达	(596)
13.2	测速激光雷达	(605)
13.2.1	测速激光雷达的基本要求	(606)
13.2.2	相干激光多普勒测速原理	(610)
13.2.3	车/机载 CO ₂ 相干激光多普勒雷达	(613)
13.2.4	测风激光雷达	(617)
13.2.5	尖峰效应测风激光雷达	(623)
13.2.6	差动激光多普勒技术	(626)

13.2.7 多通道微血管血液流动监测仪	(628)
13.3 微脉冲激光雷达	(630)
13.3.1 基本原理	(630)
13.3.2 微脉冲激光雷达的技术关键	(633)
13.3.3 微脉冲激光雷达结构与应用	(639)
参考文献	(642)
第 14 章 成像激光雷达	(645)
14.1 成像探测技术基本概念	(646)
14.1.1 作用和地位	(646)
14.1.2 成像探测基本框图和功能	(647)
14.1.3 成像激光雷达分类	(649)
14.1.4 应用	(652)
14.2 成像激光雷达的结构	(652)
14.2.1 图像采集传感器	(653)
14.2.2 数字图像处理系统	(655)
14.3 图像处理基础	(656)
14.3.1 基本概念	(656)
14.3.2 数学基础	(659)
14.3.3 基本处理方法	(662)
14.4 计算机图像处理	(665)
14.4.1 图像的数字变换	(665)
14.4.2 影响图像质量的基本因素	(667)
14.4.3 伪彩色和假彩色增强显示	(669)
14.5 相干成像激光雷达	(672)
14.5.1 CO ₂ 相干成像激光雷达	(672)
14.5.2 合成孔径激光成像雷达	(676)
14.5.3 光控相控阵成像激光雷达	(681)
14.5.4 焦平面凝视成像	(687)
14.5.5 CCD 成像系统简介	(690)
14.6 紫外、双色探测和多光谱成像	(696)
14.6.1 紫外探测	(696)

14.6.2 多光谱成像	(700)
参考文献	(702)
第 15 章 激光雷达系统设计	(703)
15.1 激光雷达系统总体技术	(704)
15.1.1 激光雷达系统总体的系统分析与综合	(704)
15.1.2 激光雷达系统总体指标估算和精度	(707)
15.2 系统可靠性	(715)
15.2.1 系统可靠性的基本概念	(715)
15.2.2 系统可靠性的基本参数	(716)
15.2.3 系统可靠性模型	(718)
15.2.4 系统的可靠性预计和指标分配	(720)
15.2.5 系统的可靠性设计原则和评估	(721)
15.3 系统环境适应性	(724)
15.3.1 环境适应性的主要内容	(725)
15.3.2 工作环境的适应性	(725)
15.3.3 激光雷达系统可靠性与环境适应性	(726)
15.4 系统可维护性	(727)
15.4.1 系统可维护性基本概念	(727)
15.4.2 系统可维护性的设计	(729)
15.4.3 系统可维护性的内容	(730)
15.5 系统总体试验和测试	(731)
15.5.1 系统总体试验和测试主要内容	(731)
15.5.2 系统总体试验和测试主要方法	(732)
15.5.3 系统总体性能评估	(733)
15.6 测距跟踪激光雷达系统设计	(734)
15.6.1 武器系统的基本要求	(734)
15.6.2 系统分析	(736)
15.6.3 系统方案初步选择	(738)
15.6.4 系统结构与参数	(740)
15.6.5 测距系统性能分析	(741)
15.6.6 跟踪随动系统	(742)

15.6.7 总体结构设计	(746)
15.6.8 测距跟踪激光雷达系统性能测试和性能评估	(747)
参考文献	(751)
第 16 章 激光雷达的应用	(753)
16.1 激光雷达在合作目标空间航天器交会对接中的应用	(754)
16.1.1 背景和基本概念	(754)
16.1.2 基本结构和特性	(758)
16.1.3 建模与仿真	(764)
16.2 激光雷达在反卫星天基精密跟瞄系统中的应用	(766)
16.2.1 背景和概念	(766)
16.2.2 基本结构与特性	(768)
16.3 激光雷达在精确制导和综合火控系统中的应用	(772)
16.3.1 背景和概念	(772)
16.3.2 技术要求和特点	(774)
16.3.3 综合火控激光雷达	(779)
16.4 激光雷达在巡航导弹图像匹配制导中的应用	(783)
16.4.1 背景和概念	(783)
16.4.2 组成和原理	(785)
16.4.3 防巡航导弹对地攻击球载成像激光雷达网络	(789)
16.5 激光雷达在地形回避和防撞中的应用	(792)
16.5.1 背景与概念	(792)
16.5.2 LOTAWS 系统结构与特性	(794)
16.6 激光雷达在大气探测和环境监测中的应用	(795)
16.6.1 物理模型	(795)
16.6.2 全球大气化学国际合作计划	(798)
16.6.3 差分吸收激光雷达	(804)
16.6.4 测云激光雷达	(809)
16.7 水下探测蓝绿激光雷达	(812)
16.7.1 蓝/绿激光器	(812)
16.7.2 激光在水中的传输特性	(812)
16.7.3 对海探测激光雷达	(818)

参考文献	(821)
第 17 章 自由空间激光通信系统	(823)
17.1 引言	(824)
17.2 自由空间激光通信的关键技术	(828)
17.2.1 传输信道的影响	(828)
17.2.2 通信链有效链长允许的功率余量	(831)
17.2.3 精密跟踪和瞄准	(834)
17.3 FSO 系统数字化	(839)
17.3.1 信息的基本概念	(839)
17.3.2 信息的编码和调制	(842)
17.3.3 信道容量和误码率	(844)
17.4 自由空间光通信主要元器件	(846)
17.4.1 光源	(846)
17.4.2 光探测器	(847)
17.4.3 光中继器件和放大器	(849)
17.4.4 光网络器件	(854)
17.5 FSO 系统设计	(857)
17.5.1 点对点通信链路	(857)
17.5.2 设计原理	(857)
17.5.3 FSO 系统的功率损耗预算	(859)
17.5.4 最大衰减值	(864)
17.5.5 最大通信链长计算	(864)
17.6 多传感器数据融合	(865)
17.6.1 引言	(865)
17.6.2 基本概念和定义	(867)
17.6.3 多传感器数据融合简介	(868)
17.6.4 多传感器数据融合应用	(876)
17.6.5 发展趋势	(877)
参考文献	(879)
第 18 章 激光雷达发展趋势	(881)
18.1 激光雷达的光电对抗	(882)

18.1.1 基本概念	(882)
18.1.2 光电侦察	(882)
18.1.3 光电干扰	(884)
18.1.4 光电防御	(887)
18.1.5 光电隐身及屏蔽	(887)
18.2 激光雷达理论的发展	(891)
18.2.1 经典电磁理论	(892)
18.2.2 量子理论	(893)
18.2.3 光电子基本量子效应	(896)
18.2.4 光子晶体	(899)
18.2.5 集成光学理论	(901)
18.2.6 微系统理论	(908)
18.3 激光雷达与信息化、微型化战争	(924)
18.3.1 信息化指挥系统	(924)
18.3.2 智能武器系统	(926)
18.4 激光雷达产业化	(931)
18.4.1 科学、技术和工程	(931)
18.4.2 人类、环境和经济	(934)
18.4.3 保障条件	(934)
参考文献	(936)
附录 A 术语	(939)
附录 B 基本物理量单位、符号及物理常数(MKSA 制)	(965)

第 11 章

搜索和跟踪



前面几章讨论了激光雷达的发射和接收技术,讨论了它们的核心元器件、辐射源和探测器,又讨论了目标和背景的光学特性,还讨论了激光信号发射和回波信号传输过程大气环境的影响等关键基础技术。现在讨论涉及激光雷达系统总体的关键技术。

对目标进行测量之前,首先要对可能出现目标的空间进行搜索,并对目标实行有效的跟踪,才能实行精确测量。搜索是发现目标,给出其粗略的运动状态参数,对跟踪目标实行引导。跟踪是锁定和以动态或静态方式始终对准一个或数个目标,获得其高精度的连续数据。因此,搜索和跟踪是一个广泛的物理和工程概念,也是激光雷达不可缺少的组成部分和关键技术之一。

11.1 概论

11.1.1 地位和作用

搜索与跟踪的主要任务,是在给定的探测空域内,用一定的电磁和光电辐射波束,以一定的探测概率和虚警概率探测所有目标。探测的目标有宇宙深空间的各种辐射源和天体,近地空间大气层外的卫星及碎片,火箭和导弹,大气层内的战术导弹、巡航导弹、飞机等目标。星载、机载和弹载平台的前视或下视搜索和跟踪地面景物及在地面探测各种目标。

搜索与跟踪也可以不需要辐照目标的光源,直接探测被测物自身发射的光电辐射,或自身的非辐射物理量转换成光电辐射量的探测和显示,是一种被动式的接收和显示技术,涉及激光雷达接收技术的共性和基本的基础技术。

搜索和跟踪技术的物理实质是探测目标从亚毫米波到 γ 射线各波段的辐射,甚至要包括中子流和质子流等。探测目标自身发射辐射的,为被动式搜索和跟踪。探测各种辐射照射到目标上的反射、散射,甚至透射的辐射的,是主动式搜索和跟踪。当辐射是电磁辐射时,便是常说的监视与警戒雷达;是激光辐射时,便是搜索和跟踪激光雷达。本书感兴趣的是可见光及它的波段以外两端的辐射,尤其是激光辐射和热辐射。图 11.1 说明搜索与跟踪的各种主要技术措施、特点及未来发展趋势。

搜索和跟踪技术的主要测量参数有探测空域,它包括最大探测距离、最小探测距离、最大方位扫描角和俯仰扫描角包围成的空间。其次是探测与跟踪的精度

及分辨率。再次,为了了解目标的动态状况还需要一定的数据率。最后要获得目标更多的信息,搜索和跟踪技术往往大量采取成像探测技术,其参数有成像的像素数量、成像的帧频、几何分辨率、灰度分辨率和色彩分辨率等。

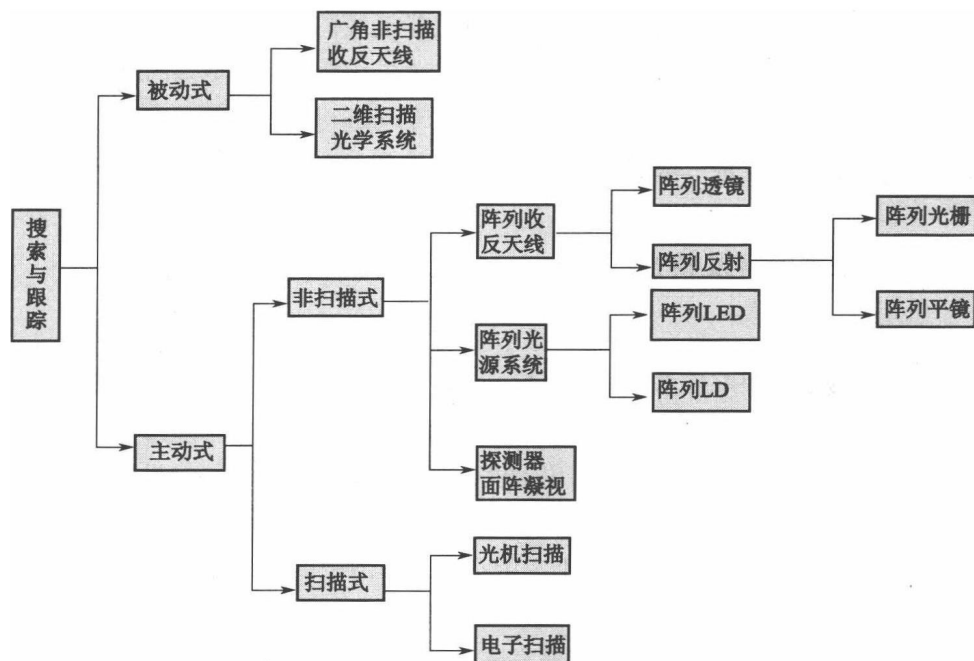


图 11.1 搜索与跟踪的各种主要技术措施、特点及未来发展趋势

搜索与跟踪技术的核心技术除了收发技术外,要保证在搜索空域中,发现和连续跟踪,并不遗漏目标,还有目标的信息种类和信息量多少。这就涉及收发天线技术。本章讨论被动接收的天线技术。

搜索与跟踪技术的基本方法有光学目测、光学经纬仪等传统光学法,光电探测和激光雷达等光电子法,电磁雷达也是重要方法。本书仅限于讨论光电子法。

搜索与跟踪技术发展的主要特点是:

(1) 被动探测技术仍是搜索与跟踪的主要方式。宇宙间任何物体都有温度,只要温度高于 -250°C 以上,都会发射热辐射。热辐射探测不会遗漏所探测空间的任何目标。采取非扫描广角望远镜接收光学天线系统,或各种二维扫描轨迹的接收光学系统是它的技术关键。

(2) 传统的主动式搜索与跟踪技术是对探测空间的光机扫描,技术比较成

熟,并发展为电子扫描方式。各种光机扫描技术在激光雷达中仍然广泛采用。

(3) 由于微光机械电子系统 (Micro-Opto-Electro-Mechanical System, MOEMS) 技术的发展,出现了非扫描式搜索与跟踪技术。从发射技术考虑可将一束激光通过阵列滤光器、透镜或反射镜等微光学天线扩束和准直,变成多束扩束后的激光束发射出去。它的优点是可以获得较大的探测空间、更多的目标回波信息,也有利于实现成像。但需要和阵列探测器配套进行信号接收。面阵凝视阵列探测器均可以作为搜索与跟踪的接收技术的核心部件。

11.1.2 基本内容及特性

1. 基本内容

传统的搜索与跟踪技术利用光机扫描,将来自目标的辐射、反射和散射的光电辐射对波长、时间和空间分布的独立变量函数关系,在一定距离内,通过测量接收辐射功率或通量,转变为辐射出射度、强度、亮度、照度等辐射量及其光谱或空间分布的稳态和非稳态时变的动态变化等实现。

搜索与跟踪技术的核心是图 11.2 所示原理框图中的光学系统、调制器、探测器、前置放大器等部分组成的光电转换敏感器。加上其他功能单元,就是不同波段和功能的搜索与跟踪目标传感器系统。

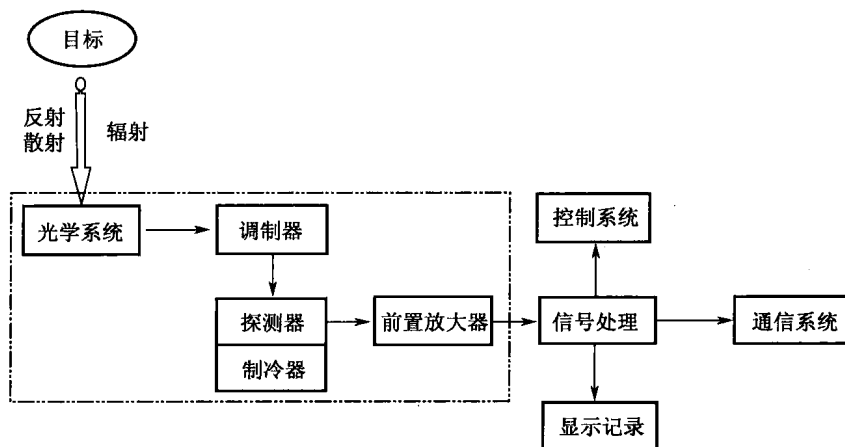


图 11.2 目标传感器原理框图

探测器是目标传感器的核心,将来自目标的光电辐射经光学系统集聚的信号转变成电信号。有些低温工作的探测器,还需制冷系统等辅助系统。也可采用非制冷常温探测器。根据不同需要和用途,将探测器后置部分,可以组成千变万化的实用系统和装置、设备。

光学系统采用良好光学性能的材料制成反射式、折射式和折反射式三种光学系统。光学系统把来自广袤空间的目标的光电辐射集聚到探测器上;或用光机扫描,对探测空间扫描,获得点目标信息;也可面目标逐点扫描,收集辐射能,以获得目标精细信息。机内导光光学系统以光谱和空间滤波方式抑制背景干扰。现在用光纤替代传统的导光光学系统,或使光电辐射直接进入探测器。光学调制器将光电辐射调制编码,从背景中提取目标特征信号或空间位置信息。

非成像搜索与跟踪技术将目标看做点辐射源,信号处理和显示记录系统比较简单。成像系统需将来自目标的光电辐射转换成黑白照片和假彩色照片或电视图像,反映目标的光电辐射分布或可视的某种物理量时间和空间分布曲线。

搜索与跟踪系统可以非接触测量,不破坏目标辐射场;结构简单,辅助装置少,测量精度高,标准偏差小于 1%,测温可到 0.1°C ;空间分辨力高,可达 μm 数量级;响应速度快,可达 ms 或 μs 数量级;安全可靠,测量直观,可测范围广,测量距离可远可近,易于自动化等,隐蔽性好和抗干扰能力强等。有体积小、重量轻的微型激光雷达,测温、测辐射系统,巨大的飞往宇宙的红外天文望远镜。与可见光相比,具有透过烟雾能力强,可昼夜工作等特点。缺点是大气影响大,背景干扰较大;有的还要求低温工作。

测温、测辐射和辐射成像是基本的搜索和跟踪系统。警戒系统、遥感系统和红外天文望远镜等是它的扩展。它又是主动式激光雷达的基础技术,完成对目标的搜索、跟踪和锁定,为激光雷达的精密测量和跟踪创造条件。二者互相融合越来越密切。

2. 基本特性

1) 静态特性

静态特性指在输入与时间无关的信号时,系统输出量与输入量之间的关系。可用一个不含时间变量的代数方程,或以输入量作为横坐标,把与其对应的输出量作为纵坐标画出特性曲线来描述。表征静态特性的主要参数有线性度、灵敏度、分辨力和迟滞等。

2) 动态特性

动态特性指在一定的时间和空间范围内输入发生变化时的输出特性。动态特性常用该输出特性对某一标准,如一定形式黑体辐射信号作为系统输入信号的响应来表示。光电雷达对标准输入信号响应容易用实验方法求得,并且它对标准输入信号响应与它对任意输入信号响应之间存在一定关系,往往知道了前者就能推定后者。常用的标准时变输入信号有阶跃信号和正弦信号,动态特性也常用阶跃响应和频率响应来表示。

3) 线性度

实际静态特性是条曲线而非直线。为使系统读数具有均匀刻度,常用一条拟合直线近似地代表实际特性曲线,线性度(非线性误差)就是近似程度的性能指标。拟合直线选取,如将零输入和满量程输出点相连理论直线作为拟合直线;或将与特性曲线上各点偏差平方和为最小的理论直线作为拟合直线,称为最小二乘法拟合直线。

4) 灵敏度

灵敏度是指系统在稳态工作情况下,输出量变化 Δy 对输入量变化 Δx 的比值,是输出-输入特性曲线的斜率。若输出和输入之间为线性关系,则灵敏度 S 是一个常数。灵敏度量纲是输出、输入量量纲单位之比。当输出、输入量量纲相同时,灵敏度为放大倍数。在传感器接收辐射能变化 1W 时,输出电压变化为 20mV ,则其灵敏度为 $20\text{mV} \cdot \text{W}^{-1}$ 。提高灵敏度,可得到较高的测量精度。但灵敏度越高,测量范围越窄,稳定性往往也越差。

5) 分辨力

分辨力是系统感受到被测量最小变化的能力。输入量从某一非零值缓慢地变化,当输入变化值未超过某一数值时,传感器输出不会发生变化,即传感器对此输入量变化是分辨不出来的。只有当输入量变化超过分辨力时,其输出才会发生变化。传感器在满量程范围内各点分辨力并不相同,常用满量程中能使输出量产生阶跃变化的输入量中最大变化值衡量分辨力。用满量程百分比表示分辨率。理论上还可以系统传递函数表示。

6) 迟滞特性

迟滞特性表征光电雷达在正向(输入量增大)和反向(输入量减小)行程间输出-输入特性曲线的不一致程度。例如,对辐射强度测量时,通常用这两条曲线之间最大差值 ΔI_{\max} 与满量程输出 I_s 的百分比表示。迟滞是由系统内部组件和

部件存在能量吸收造成的。

11.2 搜索与跟踪系统特性

11.2.1 基本作用距离方程

各种搜索与跟踪系统能探测多大的距离,应考虑目标、光学系统、探测器和信号处理等因素影响,并考虑系统整体特性,综合平衡表示为基本的辐射作用距离方程。

$$R = [I\tau_a]^{\frac{1}{2}} \left[\frac{\pi}{2} D_0 (NA) \tau_0 \right]^{\frac{1}{2}} [D^*]^{\frac{1}{2}} \left[\frac{1}{(\Omega \Delta f)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{V_s}{V_n} \right)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (11.1)$$

方程式用四个因子的连乘积表示。

1. 目标因子

目标因子 $[I\tau_a]$ 是指到达接收光学系统孔径处的回波辐射,是方程中最复杂的因子。这是因为目标特性本来就很复杂,又是不能控制的外部因素,与目标信息到达系统传输过程的环境有关,许多目标的特性更是事先未知的,有许多不确定因素,所以求解作用距离方程就很麻烦。

系统接收一定波长范围的目标自身辐射和反射、透射能量。辐射强度是波长的函数 $I(\lambda)$,在光电雷达响应波长 λ_1 和 λ_2 范围内辐射强度为 $I(\lambda)d\lambda$,假设光电雷达在 λ_1 和 λ_2 范围内光学系统光谱透过率为 τ_0 ,在此以外透过率为 0,即不透光。在光谱通带内辐射强度以积分值或平均值 I_λ 表示,则有 $I_\lambda d\lambda = I$ 。

搜索与跟踪系统是非接触式光电雷达,目标信息一般通过大气传输到光电雷达的光学系统入口,或通过光纤到达系统的探测器。大气传输中,大气透过率是波长和距离的复杂函数 $\tau_a(\lambda, R)$ 关系。在计算作用距离时,求解就太复杂了。因此,也需要用通带内平均值 τ_a 。

2. 光学系统因子

光学系统因子 $\left[\frac{\pi}{2} D_0 (NA) \tau_0 \right]$ 是一个可控因子, τ_0 是光学材料透过率, D_0 是光学系统入射孔直径, NA 是光学系统数值孔径。

$$NA = \frac{D_0}{2f} \quad (11.2)$$

式中, f 是光学系统等效焦距。数值孔径是设计光学系统时, 应着重考虑的参数。理论上数值孔径最大值为 1, 但实际上很少超过 0.5。它牵动着 D_0 和 f 变化, 也影响系统其他因子, 甚至重量和体积。

3. 探测器因子

探测器因子 $[D^*]$ 中的 D^* 是探测器的归一化探测度或比探测度, 表达式为

$$D^* = D(A_d \Delta f)^{\frac{1}{2}} \quad (11.3)$$

式中, A_d 是探测器敏感元面积, Δf 为探测器等效噪声带宽, 单位是 $\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ 。探测器敏感元面积 A_d 与瞬时视场 Ω 、光学系统等效焦距 f 的关系为

$$A_d = \Omega f^2 \quad (11.4)$$

探测器因子反映了整个系统的性能。

4. 信号处理与整机因子

信号处理与整机因子 $\left[\frac{1}{(\Omega \Delta f)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{V_s}{V_n} \right)} \right]$ 中的 $\frac{V_s}{V_n}$ 为信噪比, 是光电雷达均方

根信号电压和均方根噪声电压的比值。它的倒数叫等效噪声照度, 即

$$NEI = \frac{V_n}{V_s} \quad (11.5)$$

通过以上对四个因子的分析, 可知探测器性能决定整个系统性能。靠其他因子, 如减小视场角和带宽来增加作用距离, 因为有个幂次关系, 希望也不大。

11.2.2 系统的基本参数

搜索与跟踪系统不遗漏地搜索目标的前提是探测目标的温度。探测温度在 $-200 \sim +2500^\circ\text{C}$ 内的目标时, 可测量参数有灵敏度参数, 如 $NETD$ 、 $MRTD$ 、 $MDTD$ 等; 有系统分辨力参数, 如空间分辨角、瞬时视场、光学传递函数等; 有描写整机系统传递特性参数, 如信号传递函数、光谱传递函数等, 以及均匀性、畸变等。

1. 灵敏度参数

1) 噪声等效温差 (NETD)

假设目标与背景都是朗伯辐射体, 先求出系统可分辨单元接收的辐射功率, 再求出由于目标与背景温差 ΔT 引起的接收功率差异, 继而求得均方根信号电压 V_s 及均方根噪声电压 V_n 。求得信噪比 $S/N=V_s/V_n$ 。可得到 NETD 的表达式为

$$NETD = \frac{1}{(S/N)} \Delta T \quad (11.6)$$

NETD 表示系统在信噪比为 1 时的温差, 单位是 K。它反映了信噪比限制的温度分辨率, 没有考虑视觉特性的影响。

分立组件的系统噪声等效温差为

$$NETD = \frac{\pi \sqrt{ab} \Delta f_R}{\alpha \beta A_0 \bar{\tau}_0 D^* (\lambda_p) \frac{c_2}{\lambda_p T_B^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_\lambda (T_B) d\lambda} \quad (11.7)$$

式中, a 、 b 是探测器敏感单元的面尺寸; Δf_R 是系统电子带宽; α 和 β 是探测器敏感元对目标张角; A_0 是光学系统入瞳面积; $\bar{\tau}_0$ 是在 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 波段内光学系统透过率; $D^* (\lambda_p)$ 是探测器峰值波长 λ_p 响应的比探测度; c_2 是第二辐射常数; T_B 是黑体温度; M_λ 是黑体在温度 T_B 的辐射出射度。式中积分由数据表可查。

2) 最小可分辨温差 (MRTD)

景物的空间频率函数, 是系统受到视在信噪比限制时的温度分辨率量度。测试时, 光电雷达系统以如图 11.3 所示的某一组四条带图案作为目标, 调节目标相对背景的温差, 从零逐渐增大, 直到在显示屏上刚能分辨出条带图案为止。此时温差就是在该组目标空间频率下的最小可分辨温差。

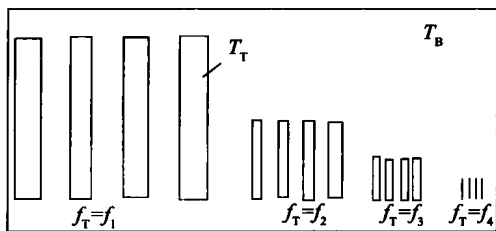


图 11.3 MRTD 测试图案

对均匀大目标图案, 由式 (11.6), 得

$$(S/N)_M = \frac{1}{NETD} \Delta T \quad (11.8)$$

该信噪比是由目标与背景温差 ΔT 测得的。与前式不同, 考虑带形图案方波函数, 按傅里叶级数展开近似取值修正, 人眼感受目标亮度由平均值、时间积分

效应、俯仰观测空间积分效应、水平观测积分效应等四项修正, 于是有

$$MRTD = \frac{3(NETD)N_T \sqrt{\alpha\beta}}{(MTF)_s \sqrt{T_e F} \sqrt{\Delta f_R} \sqrt{\tau_d}} \quad (11.9)$$

式中, N_T 是目标图案空间频率; α 和 β 是探测器敏感元对图案的张角; $(MTF)_s$ 是系统不包含外部设备自身调制函数; T_e 是人眼积分时间, 一般为 0.2s; F 是观测图案帧频; Δf_R 是系统电子带宽; τ_d 是目标图案在探测器驻留时间。 $MRTD$ 的单位是 K。

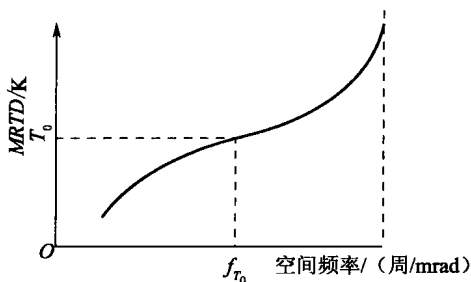


图 11.4 $MRTD$ 与空间频率关系

分别对不同空间频率条带图案重复上述测量, 可得到 $MRTD$ 曲线, 如图 11.4 所示。

$MRTD$ 综合描述了在噪声背景中, 光电雷达对目标的空间及温度分辨能力。试验数据和理论结果比较符合, 容易测量, 再现性好; 体现了帧频对系统灵敏度的影响。 $MRTD$ 是一种带有主观因素

的量度, 未考虑人眼调制传递函数的影响, 测试结果会因人而异。此外, 实际测量时人眼视觉阈值易受到随机噪声、干扰和反差比的影响; 在外场测量也有一定误差。

3) 最小可探测温差 ($MDTD$)

它是将 $NETD$ 和 $MRTD$ 的概念在某些方面进行取舍后得出的。 $MDTD$ 仍是采用的 $MRTD$ 的观测方式, 由在显示屏上, 刚能分辨出目标时, 所需目标对背景温差来定义。但 $MDTD$ 采用的标准图案是位于均匀背景中的单个方形目标, 尺寸可调整, 这是对 $NETD$ 与 $MRTD$ 标准图案特点综合。其表达式为

$$MDTD = \left[\frac{F \sqrt{T_e}}{D_0 D_{\lambda p}^* \cdot \alpha\beta \cdot n^{\frac{1}{2}}} \right] \cdot \left[\frac{4}{\pi} \cdot \frac{\tau_d^{\frac{1}{2}} \sqrt{\Delta f}}{\tau_0 \eta_{sc}^{\frac{1}{2}}} \right] \cdot \left[\frac{1}{\tau_d \Delta L} \right] \quad (11.10)$$

$MDTD$ 用来估算点源目标可探测性是有价值的。可在外场测量和应用中, 评价系统性能。

2. 系统分辨力参数

系统分辨力是将物体结构图像分解为许多线或点元素, 系统区分两个物体元

素的最小距离,还包括与物体结构相关的透过特性、对比度变化和位相移动。

过去较多用瞬时视场的空间分辨角 $\Delta\theta$,现在则多用调制传递函数 MTF 描述系统分辨力。其中光学传递函数 OTF 是一个理想参数。

1) 瞬时视场的空间分辨角 $\Delta\theta$

瞬时视场也称为空间分辨力,单位为 mrad 。由单元探测器光敏元面尺寸及光学系统焦距所共同决定的观察角,是反映系统空间分辨力高低的指标。

2) 调制传递函数

通常用于线性时不变系统 (Linear Time-Invariant, LTI) 的单输入、单输出系统。传递函数有对比度传递函数 (Contrast Transfer Function, CTF) 和位相传递函数 (Phase Transfer Function, PTF),其频域内的一般表达式为

$$MTF(f_x) = \frac{M_i}{M_o} \quad (11.11)$$

式中, f_x 是信号频率, M_i 是输入量, M_o 是输出量。

根据线性理论,对于由一系列具有一定频率特性(空间或时间的)分系统所组成的光电雷达系统,只要逐个求出分系统传递函数,其乘积直接决定系统功能和性能,就是整个系统传递函数。

$$MTF = MTF_o \cdot MTF_d \cdot MTF_e \cdot MTF_m \cdot MTF_{om} \cdot MTF_{eye} \quad (11.12)$$

或

$$MTF = \prod_{i=1}^N MTF_i \quad (11.13)$$

式中, MTF_o 是光学系统调制传递函数; MTF_d 是探测器传递函数; MTF_e 是电子线路传递函数; MTF_m 是显示器传递函数; MTF_{om} 是大气扰动传递函数; MTF_{eye} 是人眼调制传递函数。前三项因子是光电雷达核心调制传递函数,它也可以增加或减少某些子、分系统单元,如增加光机扫描,就变成扫描成像辐射系统。显示器传递函数反映了外部设备性能,它也可以是计算机、自动控制系统和通信系统。大气扰动传递函数反映了环境对光电雷达的影响。人眼能发现能量起伏为 0.05,所以人眼能接收感知的极限调制度为 0.026。

3) 光学传递函数

光学传递函数是以空间频率为变量的传递光学图像的调制度和相移的传递函数。传递函数客观地反映成像系统的成像质量。系统存在一个截止频率,在此频率下,正弦变化的目标像的对比度降低到 0。这种对比度降低和相位漂移是随空

间频率 f_T 不同而变化的, 其函数关系称为光学传递函数。

$$OTF(f_T) = MTF(f_T) \cdot e^{jPTF(f_T)} \quad (11.14)$$

式中, OTF 是个复数; MTF 是辐射模或绝对值, 反映系统调制特性和空间频率 f_T 的关系; 即幅频特性; PTF 是相位传递函数, 反映辐射相位变化, 即相频特性。光学传递函数反映物体不同频率成分传递能力。高频部分反映物体细节情况, 中频部分反映物体层次情况, 低频部分反映物体轮廓情况。

3. 整机系统传递特性参数

整机系统传递特性参数是从整机角度描述系统输出能量和输入能量之间的关系。信号传递函数 ($SITF$) 在系统对准目标时, 反映输出亮度与输入目标背景等效黑体温差的关系, 反映整机系统动态范围调节情况, 探测目标强弱能力。光谱特性传递函数 ($SPTF$) 在测量某一波长时, 调制被测靶标辐射源温度, 维持被测靶标输出亮度不变, 测量系统输出光谱响应。由于光谱测试设备和方法都比较复杂, 而探测器又是决定整体系统能力的核心部件, 因此, 直接用探测器光谱响应来代替它。

11.2.3 系统信噪比

假设目标作为黑体扩展源, 探测器作为视场光阑, 目标敏感器性能便受到探测器噪声的限制。在探测器噪声限情况下, 背景噪声可以忽略。由式 (11.8) 有

$$(S/N)_{\text{测}} = \frac{1}{NETD} \Delta T$$

将温度量换成通量密度, 便得到噪声等效通量密度 $NEFD$, 于是对一定波长 λ , 有

$$(S/N)_{\lambda} = \frac{1}{NEFD} E_{\lambda} \quad (11.15)$$

在一定波长范围 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 内的信噪比为

$$SNR_{\text{测}} = \frac{\pi \sqrt{q\beta} D_0}{4F \sqrt{\Delta f}} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{\lambda} \tau_{0\lambda} D^* d\lambda \quad (11.16)$$

11.3 搜索与跟踪系统

11.3.1 系统基本要求

测温测辐射系统是最基本、最简单的非接触式搜索系统。为了突出它的测温

特点,习惯上仍叫测温测辐射系统。它有便携式、在线式、机载和星载式三大系列,备有各种选插件和计算机软件,有测温仪(点温仪)、热像仪、热电视等。测辐射系统有微辐射计、遥感辐射系统和红外天文望远镜等。

系统的框图和功能由前面的图 11.2 表示。光学系统汇集其视场内目标辐射能量,视场大小由系统光学零件及位置决定。辐射能量聚焦在光电探测器上,转变为电信号,经过放大和信号处理电路按照仪器内部算法和目标发射率校正后,转变为被测目标温度值,并显示温度的时间及空间分布图像。还应考虑系统所在环境条件,如温度、气氛、污染和干扰等对性能指标的影响及修正方法。

整机系统应考虑以下问题。

(1) 测温量程分低温($<100^{\circ}\text{C}$)、中温($100\sim 700^{\circ}\text{C}$)和高温($700\sim 3\,200^{\circ}\text{C}$)区;工作波长应考虑测温区,由目标材料发射率和表面特性决定;目标尺寸可确定光斑尺寸,结合距离系数确定距离和光斑尺寸之比,从而确定视场及光学分辨率。

(2) 响应时间为到达稳定读数 95% 能量的时间,与探测器、信号处理及显示系统的时间常数有关。

(3) 测量精度应真实、准确。考虑使用要求和成本核算,精度极限可达 0.1°C 。

(4) 输出和显示部件应具有多功能,如峰值保持、谷值保持、平均值等,有多种外部设备和通信接口。

(5) 选用适当附件,如保护套、水冷却、气冷系统、空气吹扫器等附件;也可以选择探测头和显示器分开的系统。存在易燃气体时,选用安全型系统,在一定浓度易燃气体中安全测量和监视。

(6) 必须经过标定,还应考虑使用方便、维修和校准性能及价格等。测量的是点温,显示数字温度值。按时间依次测量,画出温度随时间变化的曲线。对目标逐点测量可得温度分布图像。

11.3.2 光机扫描装置

扫描装置是搜索与跟踪技术不可缺少的组成部分,对它的研究比较成熟。图 11.5 所示是光学扫描装置的分类。

各类被动成像探测和成像探测激光雷达基本要求相同。其中的阵列光束扫描已发展为多光束阵列光学扫描系统,并和阵列凝视探测器相结合组成非扫描成像

探测系统。

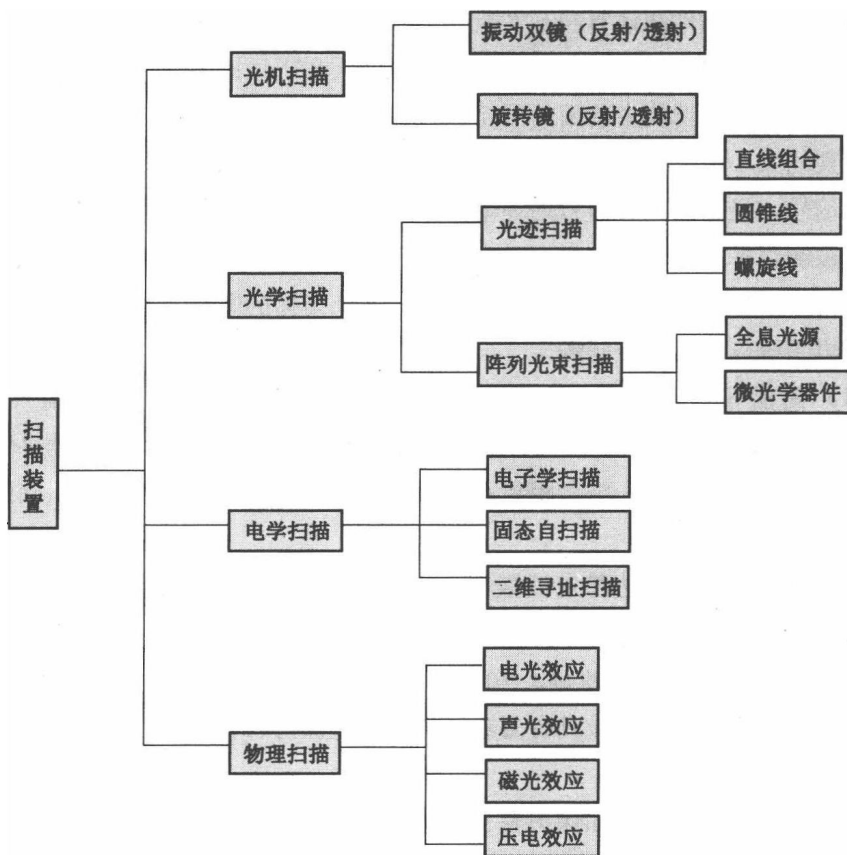


图 11.5 光学扫描装置的分类

在多元探测器出现前，对于分立式单元探测器的搜索与跟踪，要想获得目标辐射图像，必须使用光学-机械扫描装置。基本要求是：扫描频率满足每秒25~30 帧 ($\text{frame} \cdot \text{s}^{-1}$) 或 $50 \sim 60 \text{ frame} \cdot \text{s}^{-1}$ ，行频在 10^3 行以上；有较高扫描效率；在满足系统灵敏度要求情况下，应体积小，重量轻，成本低等。

主要扫描方式有位置在距光学系统前的反射式物方空间扫描镜和像方扫描镜位于探测器前两大类。光机扫描器有：摆动式平面反射镜、旋转反射镜、旋转折射棱镜、旋转折射光楔等。扫描方式有：旋转反射镜股行扫+摆镜帧扫；折射棱镜帧扫+反射镜股行扫；两个折射棱镜帧行扫；两个平面摆镜帧行扫。

线列多元器件出现后，出现了并扫、串扫和串并扫方式。面阵和凝视焦平面

多元探测器出现后, 扫描系统就用得较少了。

为了得到探测空间的总视场中目标的辐射量, 必须对探测空间进行扫描。通常由机械传动光学扫描部件完成, 所以叫光机扫描, 如图 11.6 所示。单元探测器成像用光机扫描在两个方向扫描, 将物空间扫描点上的目标辐射能量聚焦到探测器上, 转变成电信号输出, 经过信号处理, 就可以在显示器上以灰度图像表示出来。

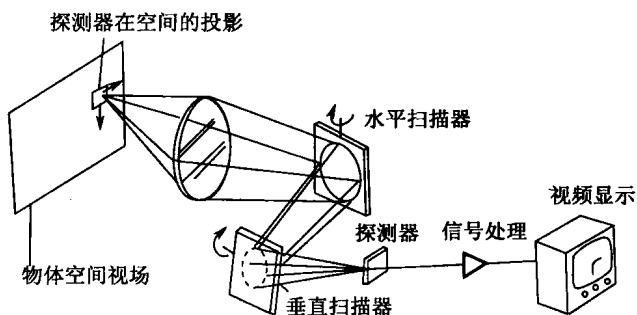


图 11.6 光机扫描系统成像的原理

系统的灵敏度与扫描速度有关, $NETD$ 为 $0.1 \sim 1^\circ\text{C}$, 扫描帧频只有 $0.2 \sim 25 \text{ frame} \cdot \text{s}^{-1}$, 图像的线数少, 清晰度差。探测器瞬时视场非常小, 在 1 mrad 以下。

电子束扫描用于多元探测器热成像系统。固体自扫描用于 CCD 面阵探测器成像系统。这两类热成像系统中, 也曾经用过光机扫描机构, 只有在凝视型焦平面探测器中才可能取消扫描机构。

1. 扫描方式

有以物点为固定参考点, 置于光学聚焦系统之前的物方扫描和像方扫描; 同样有以像点为固定参考点, 置于聚焦光学系统和探测器之间的物方扫描和像方扫描。物方扫描的扫描器位于聚焦光学系统前平行光束中, 又叫平行光束扫描。

图 11.7 (a), (b) 所示是物点参考的物方和像方扫描, 图 11.7 (c) 中将物方光束经望远镜头压缩光束宽度后由扫描机构扫描, 再经探测器光学系统会聚成像, 这种扫描机构也称做伪物扫描系统。

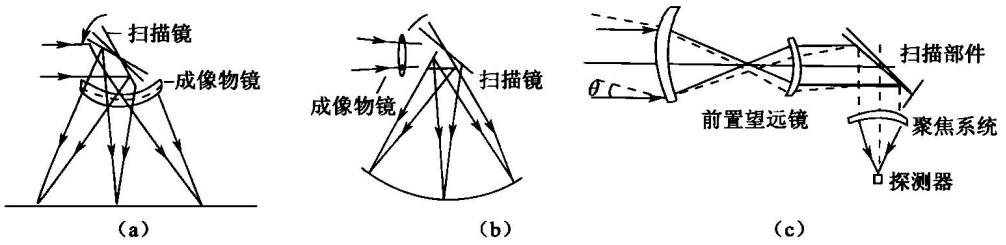


图 11.7 物点参考的物方和像方扫描

图 11.8 (a), (b) 所示是像点参考的物方和像方扫描。入射光束经光学系统会聚, 在会聚光路中插入可摆动平面反射镜, 对会聚光束扫描。像方扫描扫描器位于聚焦光路中, 又叫聚焦光束扫描。

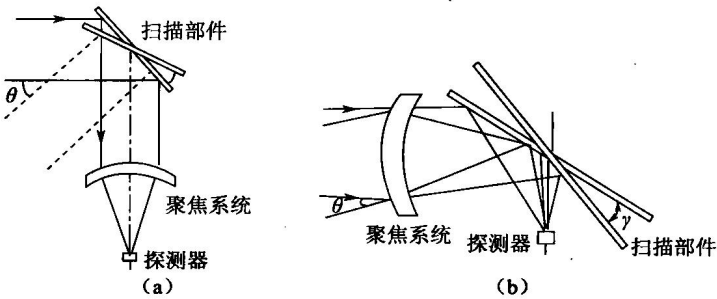


图 11.8 像点参考的物方和像方扫描

表 11.1 给出物方扫描和像方扫描两种方式的比较。

表 11.1 扫描方式比较

参 数	物 方 扫 描	像 方 扫 描
扫描场	平直	弯曲
像质	多数无像差	像差不可避免
扫描器光学质量影响	影响小, 易校正像差	影响大, 难校正像差
扫描速度	慢	快
体积和重量	大	小
用途	民用多	军用多

2. 扫描部件

光机扫描器是最基本的扫描机构, 它的行扫描部件有下面几种: 摆动平面

镜、旋转多面镜、旋转折射棱镜、旋转光楔、摆动透镜、旋转 V 型反射镜。最常用的为前面三种。摆动平面镜既可以用于平行光束扫描，也可以用于会聚光束扫描。旋转多面镜和摆动平面镜具有相同的基本特性，因此它也可以用于平行光束扫描或会聚光束扫描。旋转折射棱镜只能使光线平移而不改变其前进方向，所以它只用于会聚光束扫描。主要特性有摆动机构转角与物空间转角的关系；扫描机构扫描时对系统像差影响；扫描效率和扫描部件尺寸等。表 11.2 列出用得较多的主要光机扫描部件的特点。

表 11.2 光机扫描部件的特点

类 型	特 点	扫描视场	扫描速率	扫描效率	孔径效率	图像质量
摆 动 双 平 面 镜	一定范围内 周期摆动	窄	低	高	高	散焦，质量低
旋转平面镜	绕三正交轴 之一转动	宽	低	低	高	一般
旋 转 折 射 棱 镜	横向移动会 聚光束	有限	一般	较低	低	有像差，一般
旋转反射棱镜	高速转动	宽	高速	中等，与面 数有关	低	散焦，一般
旋转折射光楔	双光楔旋转	有限	较高	和楔形有关	高	差

1) 摆动平面反射镜

工作原理由图 11.9 说明，当平面反射镜作平行光束扫描时，若入射光线保持不动，当镜面转角为 γ 时，物空间出射光线方向转角 θ ，将为镜面转角 γ 的一倍，即

$$\theta = 2\gamma \quad (11.17)$$

平面反射镜只将入射平行光束转折一个方向，对系统像差没有任何影响。

反射镜面所需的最大尺寸 l 与入射光束宽度 D_0 及镜面转角 γ 的关系为

$$l = \frac{\sqrt{2}D_0}{1 + \sin\gamma} \quad (11.18)$$

平面反射镜用于会聚光束扫描时，其光路如图 11.10 所示。

在镜面初始位置 M ，入射光线自 c 点沿 $a+b$ 光程至 D ，当镜面转动 γ 角至 M' 位置时，为保持像点位置 D 不变，则入射光线应转动 θ 角，这时光程为 c 。由几何关系，有

$$c \leq a + b \quad (11.19)$$

可以推得 θ 与 γ 的关系为

$$\theta = \arctan\left(\frac{b + \sin 2\gamma}{a + b \cos 2\gamma}\right) \quad (11.20)$$

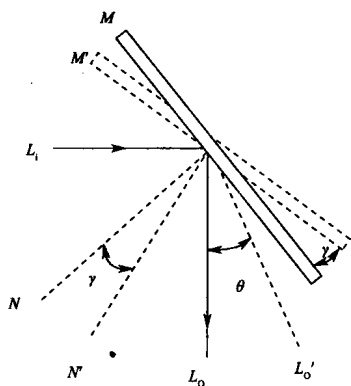


图 11.9 摆动平面反射镜工作原理

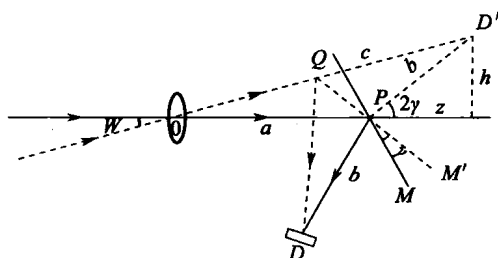


图 11.10 平面反射镜会聚光束扫描光路

当 θ 与 γ 都较小时，近似地有

$$\left. \begin{aligned} \theta &\approx \frac{2b\gamma}{a+b} \\ \gamma &\approx \frac{a+b}{2b}\theta \end{aligned} \right\} \quad (11.21)$$

因为平面镜转动后，光程发生变化，所以会因散焦而增大系统像差。

扫描效率由所观察的空间角度与镜面摆动角度之比决定。镜面摆动角度根据所需观察空间角度设计，使空程尽量小。摆动镜正程使用，回程不用，扫描效率一般小于 50%。若加大回程速度，可提高扫描效率。

2) 旋转反射镜鼓 (旋转多面镜)

反射镜鼓是由 n 个矩形面镜组成的棱柱，它绕棱柱轴转动，如图 11.11 所示。

矩形镜面宽为 l ，矩形面对中心张角为 θ_i ，棱柱外接圆半径为 r_0 ，有

$$\theta_i = \frac{2\pi}{n} \quad (11.22)$$

$$l = 2r_0 \sin \frac{\theta_i}{2} \quad (11.23)$$

若镜鼓面数 n 增大, 与镜面夹角 θ_i 就减小, 当镜鼓转动半径 r_0 为定值, 镜面宽度 l 就减小, 因而允许入射光束宽度 D_0 也减小。旋转反射镜鼓扫描效率与镜面夹角 θ_i 有关。若观察视场为 $2W$, 则扫描效率为

$$\eta = \frac{W}{\theta_i} \quad (11.24)$$

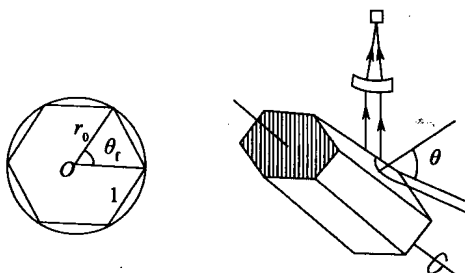


图 11.11 旋转反射镜鼓

提高扫描效率, 应增大转鼓面数 n , 为保证入射光束宽度 D_0 为定值, 要增大转鼓半径 r_0 , 所以转鼓的扫描效率与入射光束允许宽度以及转鼓尺寸有关。

摆镜摆动时, 镜面只转动而无位移; 镜鼓转动时, 镜面除转动外还有位移。若入射光束宽度为定值, 则当镜鼓转动时, 会使扫描区域边缘部分的入射光束不能全部进入视场而产生渐晕现象。在平行光束扫描情况下, 为保证不发生渐晕现象, 当入射光束宽度 D_0 为定值时, 反射镜鼓半径 r_0 为

$$r_0 = \frac{D_0}{2\cos\theta\sin\left(\frac{\theta_i - \gamma}{2}\right)} \quad (11.25)$$

式中, θ 为入射光束相对于镜面的平均入射角; γ 为镜面有效转角 ($2\gamma = 2W$)。可知, 反射镜有效转角 γ 不能取得过于接近 θ_i , 否则 θ_i 和 γ 值小, 而 r_0 值将相当大。扫描效率为

$$\eta = \frac{W}{\theta_i} = \frac{\gamma}{\theta_i} \quad (11.26)$$

从扫描效率角度考虑, 当 γ 和 θ_i 差得较多时, 扫描效率又将受较大影响。

旋转反射镜鼓与摆动平面镜的工作状况基本一致, 因此转角关系和像差情况也基本相同。旋转反射镜鼓一般用于平行光束扫描作为行扫描器用; 在作为会聚光束扫描器用时, 应注意像差校准。

3) 旋转折射棱镜

旋转折射棱镜为一正 n 面棱柱, 绕棱柱中心轴转动, 如图 11.12 所示。旋转折射棱镜扫描效率 η 与棱镜面数 n 及棱镜有效转角 γ 有关, 有

$$\eta = \frac{\gamma}{\theta_i} = \frac{\gamma}{2\pi/n} \quad (11.27)$$

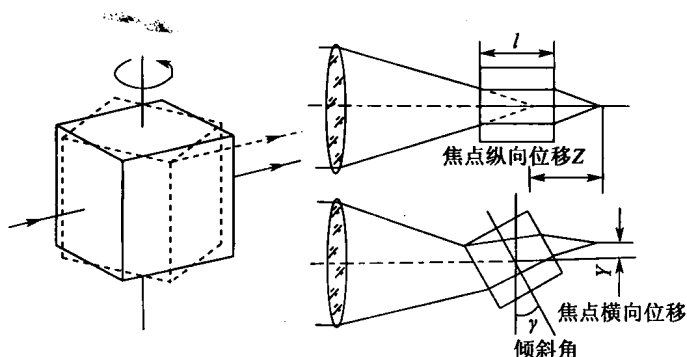


图 11.12 旋转折射棱镜

计算棱镜有效转角 (倾斜角) γ 时, 由有效视场 $2W$ 、系统焦距 f 、棱镜厚度 l , 用光路追迹算出像点横向偏移量 Y , 然后再算出 γ 。对旋转折射棱镜, 有较高效率。旋转折射棱镜只用于聚光束扫描, 尺寸可以做得较小, 棱镜厚度又与扫描效率及系统焦距有关, 且棱镜面数 n 越多, 则棱镜厚度值 l 应越大。

扫描光学系统的主要参数有: 通光口径 D 、焦距 f 、瞬时视场角 α 和 β 、观察视场角 W_H 和 W_V 、帧时间 T_f 和 T_{fov} , 即对视场完成一次扫描所需时间帧速扫描效率 η 为

$$\eta = \frac{T_{fov}}{T_f} \quad (11.28)$$

$$\eta = \eta_H \eta_V$$

旋转折射光楔和摆动透镜在扫描系统中一般用得不多。

3. 阵列探测器的扫描

多元探测器的扫描方式因元件的排列方式和扫描方式不同, 分为串联扫描、并联扫描和串并联混合扫描等。光学系统和扫描机构在元数不多, 或采用线列探测器时, 需要将几种扫描器组合成不同光机扫描系统, 以保证对目标完整地扫描。二维光机扫描基本形式有以下几种。

(1) 旋转反射镜鼓做行扫描, 摆镜作帧扫描的原理如图 11.13 所示。扫描机构置于平行光束中, 且在物镜系统外侧, 是物方扫描方式。光束有效宽度 D_0 决定了系统结构尺寸较大, 不适合做高速扫描。若在旋转反射鼓镜前加一个望远镜光学系统, 可以减小入射光束宽度, 如图 11.14 中的 $D_2 < D_1$, 缩小了进入扫描

机构的光束直径。有利于缩小扫描部件尺寸,实现小型化及提高扫描速度。若 $D_2 = D_0$, 即在同样光束有效宽度下,相当扫描机构实际接收口径增大,增大了接收能量,衍射效应也减小。望远镜的角放大率为 $\Gamma = f_1/f_2 > 1$, 则在视场角 W 相同的条件下,提高了扫描效率。

$$\eta = \Gamma \eta_0 \quad (11.29)$$

式中, η_0 是未加望远镜系统的扫描效率。这种方案结构仍复杂,像差修正难度大;为提高透过率,对镀膜工艺要求高。

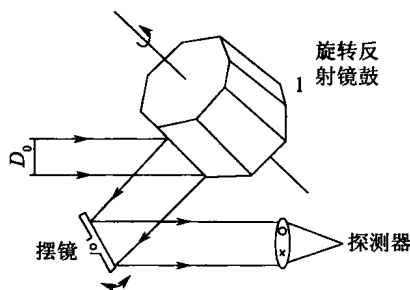


图 11.13 旋转反射镜鼓做行扫描
及摆镜做帧扫描的原理

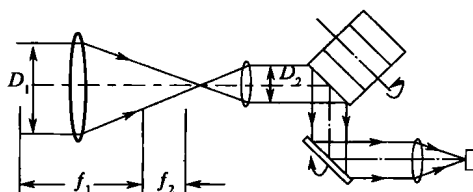


图 11.14 加望远镜系统的扫描

(2) 折射棱镜帧扫描,反射镜鼓行扫描如图 11.15 所示,四方棱镜置于前置望远镜系统光路中,做高转速稳定帧扫描。由于折射棱镜比摆镜反射效率高,故在大视场扫描和多元探测器用得较多,但像差修正困难。

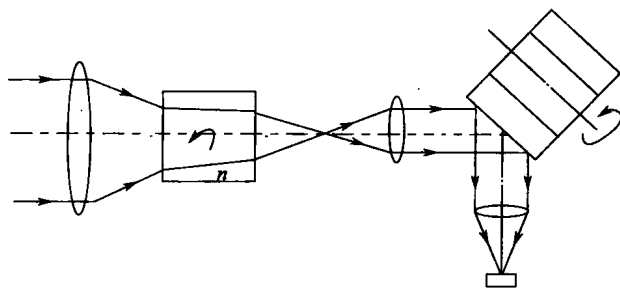


图 11.15 折射棱镜帧扫描及反射镜鼓行扫描

(3) 双折射棱镜扫描是目前用得较多的方式如图 11.16 所示。第一棱镜实行帧扫描,折射后光束靠近光轴;第二棱镜可做得很小,减轻重量,有利于高速扫描,扫描效率也高,但像差修正难度大。

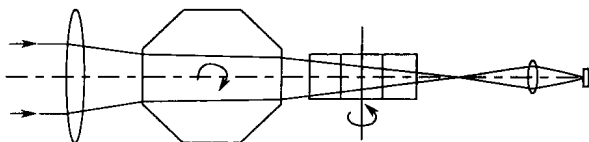


图 11.16 双折射棱镜扫描

成像系统中，多元探测器按其排列方式分解景物图像，如图 11.17 所示。它本身也可以进行扫描。图 11.17 (a), (b), (c) 所示分别为多元线列并扫、多元线列串扫和多元小面阵串并扫排列方式。线列由单列发展到有限列数的多列，最后发展到如图 11.17 (d) 所示的充满全视场的面阵焦平面凝视式，就不需要扫描了。扫描方式主要是并扫或串并扫。

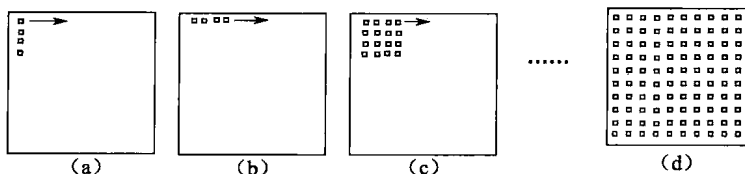


图 11.17 多元探测器阵列的扫描方式

多元探测器并扫时，输出信噪比 SNR 与系统 $NETD$ 及 ΔT 有关。计算公式十分复杂，故做简化假设。

对于一个敏感元，若目标与背景都是朗伯余弦辐射体，目标与背景之间温度差为 $\Delta T = T_T - T_b$ ，则系统的信噪比为

$$SNR = \Delta T \frac{\alpha \beta D_0^2}{4 \sqrt{ab \Delta f_n}} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} D^*(\lambda) \frac{\partial M_\lambda(T_b)}{\partial T} \tau_o(\lambda) d\lambda \quad (11.30)$$

当光束有效宽度 D_0 、光学系统瞬时视场 α 和 β 一定时，影响信噪比的因素是探测器敏感元面积 ab 、比探测度 D^* 、系统等效噪声带宽 Δf_n 和入射到探测器敏感元面上的辐射功率，即公式中的积分项，则

$$SNR = \frac{PD^*}{\sqrt{ad \Delta f_n}} \quad (11.31)$$

式中， P 是在光束有效宽度 D_0 、光学系统瞬时视场 α 和 β 一定时，照到敏感面的辐射功率。

系统基准噪声带宽与阵列探测器驻留时间有关，即

$$\Delta f_n = \frac{\pi}{4} \frac{O_s W_H W_V f_p}{n_p \alpha \beta \eta_s} = \frac{\pi}{2} \frac{O_s}{2 \tau_d} \quad (11.32)$$

过扫比达到 1, 可简化为

$$\Delta f_n = \frac{\pi}{2} \frac{1}{2\tau_d} \quad (11.33)$$

当增加到 n_v 元或列的并扫时, 若每个探测器敏感元性能是均匀的, 则每一路输出信噪比为

$$SNR_i = \frac{PD^*}{\sqrt{ab\Delta f_i}} \quad (11.34)$$

式中, Δf_i 是每一路带宽。

对 n_v 元或 n_v 列敏感元探测器, 对一幅图像每扫一次, 则探测器敏感元的总驻留时间倍增, 于是

$$\Delta f_i = \frac{1}{n_v} \Delta f_n \quad (11.35)$$

在帧速、扫描效率和图像的像元数确定时, n_v 元探测器并扫的系统带宽减小 $1/n_v$ 。信噪比为

$$SNR_i = \sqrt{n_v} SNR \quad (11.36)$$

系统信噪比提高了敏感元数目的 $n^{1/2}$ 倍, 等效噪声功率 $ENTD$ 降低 $n^{1/2}$ 倍, 系统灵敏度提高了 $n^{1/2}$ 倍。同时, 由于驻留时间增加, 对探测器的响应度要求降低。采用多元探测器, 引线 and 前放的数目增加, 对材料和工艺要求更高。

表 11.3 所示为多元探测器阵列及相应的扫描方式的性能比较。

表 11.3 多元探测器阵列及相应的扫描方式的性能比较

特 性	串 扫	并 扫
元件均匀性	各元件信号依次延后叠加, 不均匀性无影响	元件特性不均匀, 图像发生畸变和假信号, 需电路补偿
SNR 与 n 的关系	SNR 增 $n^{1/2}$ 倍, 元件数不宜超过 24 元	并扫的元件数 n 应比串扫高约 10 倍, 才有相同灵敏度
制冷	元件数 n 少, 制冷容易	元件数 n 较多, 制冷较难, 需采取特别措施
串音	元件数 n 少, 存在串音	元件数 n 较高, 串音难控制, 应降至 2% 以下
工作频带	低端应取低值, 以消除 $1/f$ 噪声	$1/f$ 噪声严重, 各类噪声较大
信号处理	光电转换次数少, 需用信号延迟及加法	光电转换次数多, 取样频率高, 同步困难
扫描速度	与单元扫描相同, 高帧频较少用	相对较低, 可用于高帧频成像