



“十二五”国家重点出版规划项目

国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

现代激光技术及应用丛书

激光对抗原理与应用

吕跃广 孙晓泉 编著

Fundamentals and Applications of
Laser Countermeasures



国防工业出版社
National Defense Industry Press



“十二五”国家重点出版规划项目

/现代激光技术及应用丛书/

激光对抗原理与 应用

吕跃广 孙晓泉 编著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书从激光对抗概念出发,对激光对抗技术的内涵、国内外发展现状进行了综述分析;聚焦激光对抗领域涉及的主要关键技术,在深入分析激光大气传输特性的基础上,结合作者多年的科研实践,从激光侦察与激光干扰、反激光侦察与反激光干扰两个对立方面、四个主要应用领域进行了分析研究,给出了其主要原理、关键技术及解决方案。

本书可供光电对抗和激光技术领域相关工程技术人员参考,可以作为相关专业的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

激光对抗原理与应用 / 吕跃广,孙晓泉编著. —北京:国防工业出版社,2015.12
(现代激光技术及应用丛书)
ISBN 978-7-118-10066-2

I. ①激… II. ①吕… ②孙… III. ①激光对抗—研究 IV. ①TN977

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第218410号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 18 $\frac{3}{4}$ 字数 358千字

2015年12月第1版第1次印刷 印数1—2500册 定价78.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

丛书学术委员会 (按姓氏拼音排序)

主 任	金国藩	周炳琨		
副主任	范滇元	龚知本	姜文汉	吕跃广
	桑凤亭	王立军	徐滨士	许祖彦
	赵伊君	周寿桓		
委 员	何文忠	李儒新	刘泽金	唐 淳
	王清月	王英俭	张雨东	赵 卫

丛书编辑委员会 (按姓氏拼音排序)

主 编	周寿桓			
副主编	何文忠	李儒新	刘泽金	王清月
	王英俭	虞 钢	张雨东	赵 卫
编 委	陈卫标	冯国英	高春清	郭 弘
	陆启生	马 晶	沈德元	谭峭峰
	邢海鹰	阎吉祥	曾志男	张 凯
	赵长明			

世界上第一台激光器于1960年诞生在美国,紧接着我国也于1961年研制出第一台国产激光器。激光的重要特性(亮度高、方向性强、单色性好、相干性好)决定了它五十多年来在技术与应用方面迅猛发展,并与多个学科相结合形成多个应用技术领域,比如光电技术、激光医疗与光子生物学、激光制造技术、激光检测与计量技术、激光全息技术、激光光谱分析技术、非线性光学、超快激光学、激光化学、量子光学、激光雷达、激光制导、激光同位素分离、激光可控核聚变、激光武器等。这些交叉技术与新的学科的出现,大大推动了传统产业和新兴产业的发展。可以说,激光技术是20世纪最具革命性的科技成果之一。我国也非常重视激光技术的发展,在《国家中长期科学与技术发展规划纲要(2006—2020年)》中,激光技术被列为八大前沿技术之一。

近些年来,我国在激光技术理论创新和学科发展方面取得了很多进展,在激光技术相关前沿领域取得了丰硕的科研成果,在激光技术应用方面取得了长足的进步。为了更好地推动激光技术的进一步发展,促进激光技术的应用,国防工业出版社策划组织编写出版了这套丛书。策划伊始,定位即非常明确,要“凝聚原创成果,体现国家水平”。为此,专门组织成立了丛书的编辑委员会,为确保丛书的学术质量,又成立了丛书的学术委员会,这两个委员会的成员有所交叉,一部分人是几十年在激光技术领域从事研究与教学的老专家,一部分是长期在一线从事激光技术与应用研究的中年专家;编辑委员会成员主要以丛书各分册的第一作者为主。周寿桓院士为编辑委员会主任,我们两位被聘为学术委员会主任。为达到丛书的出版目的,2012年2月23日两个委员会一起在成都召开了工作会议,绝大部分委员都参加了会议。会上大家进行了充分讨论,确定丛书目、丛书特色、丛书架构、内容选取、作者选定、写作与出版计划等等,丛书的编写工作从那时就正式地开展起来了。

历时四年至今日,丛书已大部分编写完成。其间两个委员会做了大量的工作,又召开了多次会议,对部分书目及作者进行了调整。组织两个委员会的委员对编写大纲和书稿进行了多次审查,聘请专家对每一本书稿进行了审稿。

总体来说,丛书达到了预期的目的。丛书先后被评为国家“十二五”重点出

版规划项目和国家出版基金资助项目。丛书本身具有鲜明特色：一)丛书在内容上分三个部分,激光器、激光传输与控制、激光技术的应用,整体内容的选取侧重高功率高能激光技术及其应用;二)丛书的写法注重了系统性,为方便读者阅读,采用了理论—技术—应用的编写体系;三)丛书的成书基础好,是相关专家研究成果的总结和提炼,包括国家的各类基金项目,如973项目、863项目、国家自然科学基金项目、国防重点工程和预研项目等,书中介绍的很多理论成果、仪器设备、技术应用获得了国家发明奖和国家科技进步奖等众多奖项;四)丛书作者均来自于国内具有代表性的从事激光技术研究的科研院所和高等院校,包括国家、中科院、教育部的重点实验室以及创新团队等,这些单位承担了我国激光技术研究领域的绝大部分重大的科研项目,取得了丰硕的成果,有的成果创造了多项国际纪录,有的属国际首创,发表了大量高水平的具有国际影响力的学术论文,代表了国内激光技术研究的最高水平。特别是这些作者本身大都从事研究工作几十年,积累了丰富的研究经验,丛书中不仅有科研成果的凝练升华,还有着大量作者科研工作的方法、思路和心得体会。

综上所述,相信丛书的出版会对今后激光技术的研究和应用产生积极的重要作用。

感谢丛书两个委员会的各位委员、各位作者对丛书出版所做的奉献,同时也感谢多位院士在丛书策划、立项、审稿过程中给予的支持和帮助!

丛书起点高、内容新、覆盖面广、写作要求严,编写及组织工作难度大,作为丛书的学术委员会主任,很高兴看到丛书的出版,欣然写下这段文字,是为序,亦为总的前言。

金国藩 周知瑞

2015年3月

前言

激光从 20 世纪 60 年代出现以来,由于其高亮度、高方向性和相干性好立即受到各国军方的重视,50 多年来各国不断地探索激光技术在军事中的应用途径。目前,军事激光技术已经取得了长足的进展,覆盖了侦察定位、通信、制导、火控、雷达、激光武器等各个方面,并已经在 20 世纪末和 21 世纪初的几次局部战争中呈现出了巨大的威力。在各种光电技术装备构成的武器系统充斥现代战场、光电威胁日趋严重的今天,作为光电对抗的重要分支,激光对抗得到了高度重视,该领域近年来的发展令人瞩目。

本书是作者在激光对抗领域 20 多年学习、研究和教学中获取知识和经验的提炼和总结,编写目的是将作者对于该领域的认识、建立的概念和探索的技术方法进行较为系统的梳理,为从事激光技术及其国防科技应用研究的有关人员提供参考。

本书主要叙述激光对抗中侦察和干扰所涉及的基本原理和应用技术。全书共 7 章,可以分为 4 个部分:第 1、2 章为基础部分,介绍激光对抗的概念、发展状况和发展预测,以及激光大气传输的重要应用知识;第 3、4 章为侦察部分,阐述激光被动侦察和激光主动侦察涉及的原理和先进技术;第 5、6 章为干扰部分,说明激光无源干扰和激光有源干扰实现的原理和技术途径;第 7 章为前沿部分,论述对激光对抗后续发展具有重要支撑作用的激光空间功率合成技术的原理、现状和发展趋势。

在本书编写中,参阅、摘引了国内外许多著作和论文,包括作者多位同事和研究生的学术成果,在此向各位作者致以衷心的感谢。同时,作为对国内激光对抗领域前人的致敬之作,本书还引用了本领域一些重要概念和技术构想

的初始文献。鉴于激光对抗尚处于快速发展阶段,新成果持续呈现,使本书难以涵盖全部新进展和新成果,希望在后续的研究和总结中能够得到一定程度的弥补。

由于作者水平有限,书中错漏和不当之处在所难免,恳请读者给予批评和指正。

作者
2015年1月

第1章 激光对抗概论

1.1 激光对抗的概念和技术内涵	001
1.2 激光对抗技术的发展现状	003
1.2.1 激光侦察与反激光侦察	004
1.2.2 激光干扰技术	006
1.2.3 激光防御技术	008
1.3 激光对抗技术的发展趋势	009
参考文献	010

第2章 激光在大气中传输

2.1 大气的光衰减	012
2.1.1 大气层	012
2.1.2 大气的光吸收	017
2.1.3 大气的光散射	022
2.1.4 激光大气衰减计算	027
2.2 大气湍流效应和非线性传输效应	032
2.2.1 大气湍流效应	032
2.2.2 大气湍流效应计算	036
2.2.3 大气非线性传输效应	044
2.2.4 大气对光束质量的影响	048
参考文献	052

第3章 激光被动侦察告警技术

3.1 概述	054
3.1.1 激光告警目的和要求	054
3.1.2 激光告警设备分类	057
3.2 工作原理	062
3.2.1 激光告警设备工作原理	062

3.2.2	信号探测	068
3.2.3	技术性能分析	075
3.3	重要单元技术与应用	082
3.3.1	多元相关技术	082
3.3.2	高精度方位分辨技术	090
3.3.3	波长测量技术	098
3.3.4	多元相关探测技术应用	103
	参考文献	111

第4章 激光主动侦察技术

4.1	激光主动侦察概述	113
4.1.1	激光主动侦察概念	113
4.1.2	激光主动侦察分类	114
4.2	目标与背景	115
4.2.1	目标特性	115
4.2.2	背景特性	125
4.2.3	激光雷达截面	127
4.2.4	激光回波	133
4.3	激光直接侦察探测	135
4.3.1	基本原理	135
4.3.2	激光主动侦察系统	138
4.3.3	激光辅助照明成像探测	147
4.4	激光相干侦察探测	153
4.4.1	基本原理	153
4.4.2	系统性能	157
	参考文献	161

第5章 激光无源干扰

5.1	激光衰减与遮蔽	163
5.1.1	分类	163
5.1.2	干扰原理	164
5.1.3	烟幕材料及其参数测试	172
5.1.4	干扰性能分析	178
5.2	激光假目标	181

5.2.1	反射式假目标	181
5.2.2	散射式假目标	186
5.3	激光隐身	190
5.3.1	激光隐身概念	190
5.3.2	激光隐身涂料	191
5.3.3	超材料与激光隐身	201
5.3.4	激光隐身结构	208
	参考文献	210

第6章 激光有源干扰

6.1	毁伤式干扰	213
6.1.1	激光对材料毁伤	214
6.1.2	破坏阈值	216
6.1.3	激光毁伤光电系统	218
6.2	致盲式干扰	220
6.2.1	激光致盲	221
6.2.2	激光致眩	228
6.3	迷茫式干扰	229
6.3.1	饱和干扰	229
6.3.2	散射干扰	234
6.4	欺骗式干扰	236
6.4.1	对激光制导武器欺骗干扰	236
6.4.2	对红外制导武器的干扰	243
	参考文献	246

第7章 激光空间功率合成技术

7.1	激光非相干合成	249
7.1.1	非相干合成的几种实现方法	249
7.1.2	脉冲激光非相干合成技术	252
7.2	激光相控阵合成	253
7.2.1	光学相控阵简介	253
7.2.2	激光相控阵合成的基本原理	254
7.2.3	激光相控阵合成的军事应用	256
7.3	光学相控阵的实现方法	259

7.3.1 光学相控阵的实现途径·····	259
7.3.2 光学相控阵结构的优化设计·····	262
参考文献·····	266

利用光能干扰阻断光学传感器或者破坏光学组件是一种由来已久的技术。阿基米德(Archimedes)或许是第一个将光电对抗技术用于实战的人^[1]。公元前212年,罗马军队包围了锡拉库扎(Syracuse,意大利西西里岛东部的一个港口城市),并最终占领了该城市,杀死了阿基米德。在战斗中,阿基米德曾让人利用大平面镜排成阵列,将太阳光聚焦到入侵的罗马舰队的船只上,给对手造成强烈的心理威慑。激光的出现为这一古老的对抗手段提供了高效的途径和工具。

自20世纪60年代激光出现以来,激光与光电子技术在军事中的应用日益广泛,它作为电子信息技术中最活跃的领域之一,已经引起了军事领域内的巨大变革,激光技术与作战系统相结合,已成为当前军事技术和装备发展的重要趋势之一。在20世纪末和21世纪初的几次局部冲突中,激光已经大量运用于情报侦察、指挥通信、火控引导、精确制导、敌我识别等各个方面,成为现代战争中一种克敌制胜的有效手段。

激光对抗是以激光为手段,对光电侦察传感系统、光电精确制导武器系统实施干扰、欺骗、损伤甚至硬破坏的技术。激光技术的进步,推动着激光对抗技术的创新发展,使激光对抗成为光电对抗领域中最活跃的分支,并在最近30年内得到了飞速的发展。大功率激光的成熟促进了激光定向能武器的发展,展示了在防空反导、激光反卫等方面的应用潜力;量子级联、参量放大等小型化红外激光技术的应用,把武器平台的自卫对抗提升到了一个新的高度;超短脉冲激光、白光激光等的出现,为带外对抗、太赫兹对抗奠定了基础;高效、大功率半导体及光纤激光技术的进步,又为天基对抗、激光通信干扰等提供了可能。

可以预料,随着激光技术的发展进步和在军事领域的应用,激光对抗的领域将进一步拓展,作用地位将进一步提高。

1.1 激光对抗的概念和技术内涵

激光对抗属于电子对抗的范畴,是光电对抗的重要分支。一般来说,激光对抗是指通过探测、发射、转发、漫反射、吸收激光能量等,削弱、破坏敌方侦察观

瞄、武器制导、信息传输和武器平台等系统效能,同时保护己方免受敌方激光干扰破坏的措施和行动。

激光对抗包括激光侦察与激光干扰、反激光侦察与反激光干扰(或称激光防御)两个对立的方面。激光对抗是激光侦察与激光干扰、反激光侦察与反激光干扰技术的总称。

激光对抗技术的分类及内涵可用图 1-1 说明。

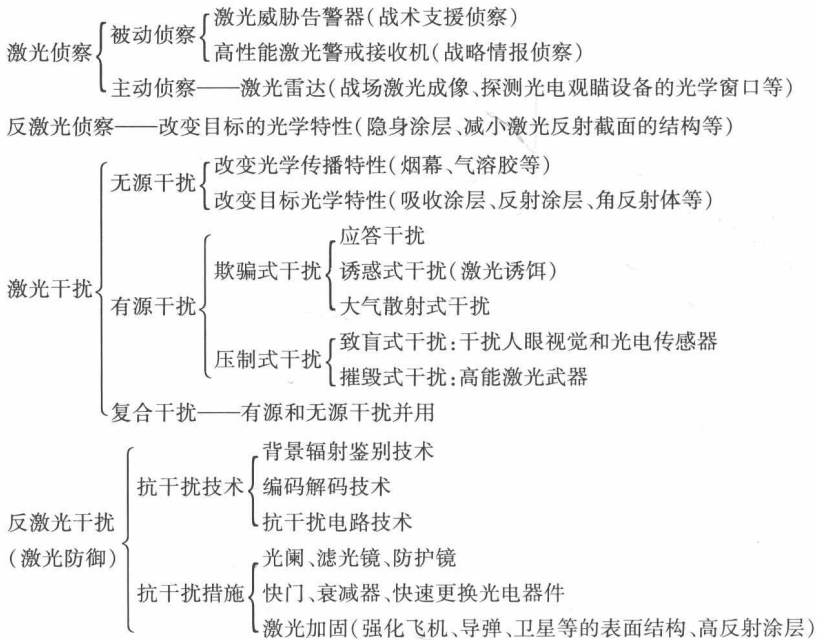


图 1-1 激光对抗技术的分类及内涵

(1) 激光侦察又有主动侦察和被动侦察之分。被动侦察使用的主要设备是激光威胁告警器。激光告警器的作用是及时准确地探测到敌方激光干扰源、激光测距机、目标指示器或激光驾束制导照射器发出的激光辐射,确定来袭方向,识别敌激光辐射源类型和实时分析其相对威胁程度并发出警报,以便采取对抗措施。激光威胁告警器是激光对抗的基本设备,它是一种战术手段,对实时性要求很高。为完成对敌激光辐射源的识别和分析,在告警器的信号处理器中都有一个威胁数据库,用来存放敌激光威胁源参数,这些参数是通过高性能激光警戒接收机战前侦察或利用技侦手段获得的。

主动侦察主要是通过主动发射激光束扫描战区,分析和提取目标回波,以便在各种人工和自然背景中发现感兴趣的战术目标,它以激光辐射为研究对象,研究其产生、变换、传输、探测及与物质相互作用的规律^[2]。激光主动侦察通常包括激光雷达、激光照明、激光侦听、激光目标特性识别设备等。

(2) 反激光侦察主要是指通过改变目标的光学特性(隐身涂层、减小激光



反射截面的结构等)的方法,使敌方激光侦察设备不能发现目标或使发现距离、分辨率降低的技术^[3]。

(3) 激光干扰的定义是,通过发射、反射、转发、吸收激光能量,阻止、削弱或破坏敌方光电器材和武器系统作战效能所采取的行动。其主要目的包括:①阻止或降低敌方光电传感器获取情报资料的能力;②制造激光假目标,使其无法提取真实信息;③提供大量数据,使被干扰系统的信息处理能力陷入瘫痪;④直接利用激光进行实体破坏。

(4) 反激光干扰措施是在光电对抗环境中为保证己方使用激光频谱而采取的行动。反激光干扰措施的显著特征是它不是单独的设备,一般和光电系统、武器平台等进行一体化设计,并配合使用。

激光干扰与反干扰设计者之间的斗争是一场智慧的较量。干扰与反干扰不可能永远一方被另一方压制。可以断言,没有无法干扰的光电系统,也没有无法对付的激光干扰,一切取决于各方采取的对策。

1.2 激光对抗技术的发展现状

激光由于其高亮度、高方向性和相干性好,一产生便立即受到各国军方的重视,50多年来各国不断地探索激光技术在军事中的应用途径,目前军事激光技术已经取得了长足的进展,激光的军事应用已经覆盖了侦察定位、通信、制导、火控、雷达、激光武器等各个方面,并已经在现代局部战争中呈现出了巨大的威力。面对战场上日益增长的激光威胁,大力发展激光对抗技术已经成为夺取未来战争主动权的重要手段,这突出地表现在以下几个方面:

(1) 激光侦察正在成为继雷达、可见光/红外侦察技术之后,光电侦察技术发展的重点。目前的激光雷达已经可以对几十千米之外的飞机、坦克等目标进行高分辨率成像,并可发现十几千米以外隐蔽的光学观瞄器材,并对其精确定位。随着激光技术的发展,高分辨率激光雷达将很快投入战场使用,使得目前伪装/隐身手段难以发挥作用。

(2) 激光制导武器作为目前制导精度最高的手段,仍将活跃在未来战争的舞台,对重点目标和平台的防护造成了极大的威胁。从目前制导技术发展的情况来看,要获得米级圆概率误差的精度,激光或光电制导是目前最可行、经济的技术体制,且受战场电磁环境干扰较少。因此,不论精确制导武器怎样发展,激光和光电末制导技术仍将是精确制导技术的主要发展方向之一。激光有源/无源干扰技术作为对抗光电精确制导武器的重要手段之一,将仍然是当前和今后一段时期对抗技术发展的重点。

(3) 大功率激光技术的发展进步,推动了战术激光武器的实用化进程。目前已经出现了用于对地面/机载光电传感器进行软硬损伤的战术激光武器

系统,大功率激光器已经可以对飞行中的飞机/导弹、卫星光电传感器进行毁伤。这使得对各种武器和平台的激光防护成为未来电子防御技术发展的重点。

(4) 光纤激光、量子激光、生物激光、超快/超宽谱激光等多种新型激光源的出现和激光光束控制技术的成熟,拓展了军用激光的应用领域,小型化机载激光武器、空间激光通信、激光宽谱侦察、天基激光对抗等成为未来发展热点。

下面分类对激光对抗技术的现状和发展趋势做一简要介绍。

1.2.1 激光侦察与反激光侦察

1.2.1.1 激光被动侦察

要对抗敌方的激光系统,首先是要发现对方发射的激光。如要对抗敌方的激光制导武器系统,不论采用有源或无源手段,必须首先探测到敌方发射的激光目标指示信息,这样才能有的放矢。但要及时准确地探测敌方发射的激光不是一件容易的事,因为不知道它什么时候从什么方向来;另外,它所用的激光波长也是未知的,特别是既要求实时监视整个空间又要有很高的角分辨率时就更困难了。国外从20世纪70年代开始投入大量的人力物力研究和发展激光告警技术^[4]。据不完全统计,美、英、德、法、挪威、以色列、瑞典、西班牙和南斯拉夫等国已经研制和装备了几十种激光告警装置。从工作原理来看,有光谱识别和相干识别两类;从工作方式来看,有直接拦截和散射截获两种;从工作波长来看,几乎都处在 $0.4 \sim 1.1 \mu\text{m}$ 硅探测器的光谱响应范围,另有少数告警器已扩展到了 $1.54 \mu\text{m}$ 和 $10.6 \mu\text{m}$ 波段。

光谱识别原理是根据军用激光仅在为数很少的几个已知的波长得到广泛应用的特点,只针对这些特定波长的光进行探测,从而实现激光告警。该原理假定,如果在战场环境探测到其中某个波长的光能量明显高于设定值,那么很可能就是由激光器产生的。这类激光告警器又有成像型和非成像型之分,具体原理在以后的章节还要详细地论述。

相干识别原理则是基于激光有高度的时间和空间相干性,在一定的条件下可以发生干涉现象,利用干涉仪的原理探测和识别激光波长、来袭方向等参数。但相干识别技术复杂,实现起来较为困难,造价昂贵。因此,只有很少几种已有告警器利用了相干识别方法。

激光告警技术目前已经广泛地装备于地面固定目标、战车、舰船、飞机等平台上,用于对激光测距、激光制导、激光雷达、激光武器等信号的侦察告警。在许多应用场合,激光告警器已经实现同激光有源干扰手段、无源干扰手段和火控系统等的有机结合。

激光告警作为目前战场激光对抗最为成熟的技术之一,其主要发展方向有以下几方面:

(1) 进一步提高告警灵敏度和精度,目前对大气散射具有截获能力的高灵敏度激光告警器已经投入战场使用,成像告警和光纤告警器的分辨率进一步提升,已经达到毫弧度量级。

(2) 波段拓展,可见光、红外、紫外复合趋势日益明显。

(3) 激光告警信息处理能力日益增强,可以快速获取激光编码,识别威胁等级等。

1.2.1.2 激光主动侦察

美国在20世纪60年代初就已开始主动激光侦察系统的研制工作,20世纪60年代末曾在越南战场上使用,采用的主要是He-Ne、Ar离子和GaAs激光器,主要用于夜间航空侦察,获得高清晰度的目标图像。20世纪70年代中期,荷兰研制了一种地面激光主动侦察系统,采用Nd:YAG作为激光源,能在白天和夜晚获得数千米外的目标图像,并可测距。目前,随着激光和光电子技术的进步,激光相干探测技术已经可以进入实际应用,激光雷达已经应用于目标精密成像、目标识别、隐身目标探测、气象预报和侦毒等方面^[5]。

将激光主动侦察技术用于引导激光致盲武器或干扰机对准敌目标上的光学窗口,是一种比较成熟的战场应用之一。它针对光学镜头比普通地物目标后向反射回波强得多的特点(称为“猫眼效应”),利用激光主动扫描某一区域,对光学观瞄器材进行主动激光侦察定位^[6]。据悉,俄军和美军装备在坦克和战车上的激光对抗系统,就是先发射低功率的激光束扫描战场,当发现后向反射强的光学窗口后,再发射高功率激光束进入光学窗口,实施致盲干扰。另外,该技术在反恐行动中还被用来探测隐藏的狙击手,并对其实施致盲干扰。

目前,随着小型化高效激光源和激光光束控制技术的进步,战场激光目标识别和雷达技术得到了迅速发展,借助于光控阵列发射接收,激光雷达作用范围和距离不断提高。可以预料,实用化激光相控阵雷达将很快成为微波相控阵雷达的补充,在警戒制导、隐身目标识别跟踪、空间对抗等军事领域得到应用。

激光主动侦察技术发展方向如下:

(1) 继续提高探测灵敏度,包括利用相干外差探测、多脉冲相干积累、新型量子探测器等。

(2) 进一步拓展激光频谱范围,在近红外和可见光频段单频探测的基础上,发展多频复合探测、中远红外外差探测等技术,并有进一步向长波(如太赫兹波段)发展的趋势。

(3) 小型化和复合化,随着半导体激光等高效小型化激光源的成熟,激光主动侦察设备更加小型化,并向和微波雷达复合的方向发展,将微波雷达的大视场和激光雷达高精度有效融合。

(4) 激光主动侦察光束控制更加灵活多样,激光相控阵将实现激光瞬时多