

远程激光测距技术及其进展

胡伟伟, 李永亮, 顾小琨, 张翼鹏, 张英明, 刘泓鑫

(长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要:随着激光器和探测技术的不断进步,远程激光测距技术也得到了迅速的发展。如今远程激光测距仪已经在军事、航天、工业等领域发挥着不可替代的作用。本文介绍了目前国内远程激光测距的现状及其研究进展,描述和分析了远程激光测距所涉及的关键技术及影响因素,对各类测距仪进行了分析和对比,并对未来远程激光测距仪的发展方向进行了总结与展望。

关键词:远程激光测距;光子计数;脉冲测距;人眼安全

中图分类号:TN249 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2019.03.003

Remote laser ranging technology and its development

HU Wei-wei, LI Yong-liang, GU Xiao-kun, ZHANG Yi-peng, ZHANG Ying-ming, LIU Hong-xin

(School of Electronic Optical Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: With the continuous progress of laser and detection technology, remote laser ranging technology has also been rapidly developed. Today, the remote laser rangefinder has played an irreplaceable role in the military, aerospace, and industrial fields. This paper introduces the current status and research progress of remote laser ranging at home and abroad, describes and analyzes the key technologies and influencing factors involved in remote laser ranging, which also analyzes and compares various types of range finder, summarizes and prospects the future development of remote laser range finder.

Key words: remote laser ranging; photon counting; pulse ranging; human eye security

1 引言

1960年,世界上第一台激光器诞生后不久,激光就因其高亮度、高方向性等优点开始应用于对目标距离的测量。1961年,美国休斯公司便研制出世界上首台激光测距仪,在此后的几十年里,激光测距技术得到了迅速的发展,各种激光测距仪相继问世,并广泛的应用在了各个领域。根据激光测距的基本原理,激光测距技术可分为三角测距法、脉冲测距法、相位测距法、干涉测距法和光子计数测距法。根据激光测距的测量范围,激光测距又可分为近程测

距、中程测距和远程测距。一般20 km以上的激光测距仪为远程激光测距仪^[1-3]。三角测距法和干涉测距法通常用于近程测距,一般测量毫米或者厘米左右的微小距离。相位测距法通常用于近程或中程测距,测量距离一般在几米到几千米。目前可用于20 km以上的远程激光测距方法主要是脉冲式激光测距法和光子计数激光测距法。脉冲式激光测距是通过测量激光脉冲在被测距离往返一次的时间,间接计算出被测距离。光子计数激光测距是指对回波信号采用光子计数和数学统计的方法得到目标的距

离。以上两类方法中,应用最多并且最为成熟的是脉冲式激光测距法^[4-6]。

2 远程激光测距技术

远程激光测距系统一般由激光发射模块、发射及接收光学系统模块、探测系统模块、电源电路模块等几个部分组成。其所涉及的关键技术有激光发射技术、激光接收技术及信息处理技术等^[4]。

在远程激光测距系统中,激光器和探测器作为系统的核心部件,基本决定了远程激光测距仪的系统性能参数(如测程、精度、体积等)。目前使用的提高激光测距仪测程的方法主要有两种:(1)采用发射脉冲功率更高、束散角更小的激光器作为光源的脉冲远程测距技术;(2)采用灵敏度更高的单光子探测器作为接收器的光子计数测距技术。这两种技术将在本文3、4节作详细介绍。此外,通过改进信号处理方式也可提高系统的测程及信噪比。如2012年浙江大学倪旭翔等人提出的基于发射脉冲串和回波脉冲串互相关的信号处理方法^[7-8],2013年北京工业大学龙腾宇等人提出的单脉冲互相关累积法^[9],都能够有效地提高了远程激光测距系统的探测能力,具有一定的理论价值和实际意义,但目前实际应用案例还不多。

相较于中程和近程激光测距系统,远程测距系统由于其测程较远,通常需要通过含有悬浮粒子、水蒸气等成分的大气进行测距。目前影响远程激光测距仪设计及其性能的因素主要有:大气衰减和湍流的影响、目标特性(漫反射率、横截面、吸收率等)、接收灵敏度、人眼安全性等。大气衰减主要是大气分子及气溶胶粒子的散射与吸收损耗造成的,其与激光波长、传输距离、天气、海拔等因素有关^[10-11]。大气湍流则会造成激光光束质量下降,从而降低了系统的测程和精度^[12]。所以在进行激光发射模块的设计时因参考大气传输窗口图谱选择适当波长的激光器,并对其实际应用环境中的透过率进行研究。目前远程激光测距系统使用的激光波长主要有:0.532 μm 、1.06 μm 、1.54 μm 、1.57 μm 和10.6 μm ,这些波长在大气中都具有较好的透过率。目标特性的研究也具有十分重要的意义,尤其是无合作目标的远程激光测距系统,其被测目标特征的不确定性使得激光后向散射机理十分复杂,导致系统的测程和精度都受到严重的影响。无合作目标的表面特性

复杂且多样,目标表面粗糙度、材质、颜色、曲率及激光与表面入射关系等都会影响到目标的漫反射率、吸收率和透射率^[13-14]。目前已经有一些目标表面散射特性的研究,但基本都是在近距离,特定材料下进行的,对远程无合作目标情况下的目标散射特性仍需进行深入研究。在设计和选择远程激光测距系统的激光波长、激光器、光学系统、探测器类型时,应对以上这些实际应用中需要面对的因素作详细了解。

3 脉冲式远程激光测距技术及其应用

在各项测距仪性能指标中,最大测程通常是远程激光测距最为重要的性能指标。脉冲式远程激光测距技术主要是通过高光束质量、窄脉宽、大能量、小束散角的激光器发射脉冲信号,并依靠较强的回波信号来测量目标距离。随着调Q及超短脉冲等技术的快速发展,脉冲式远程激光测距系统的测程和精度都得到了极大的提升^[15]。

目前脉冲式远程激光测距仪有很多种,比较常用的有:Nd:YAG激光测距仪、CO₂激光测距仪、拉曼频移激光测距仪、钕玻璃激光测距仪和光学参量振荡(OPO)激光测距仪,采用不同激光器作为光源的激光测距仪在其性能指标(测程、精度、大气透过率等)上也有很大的差异。表1为国内外各种脉冲式远程测距仪性能参数。下面将对目前几种常用的远程激光测距仪进行简要介绍^[16]。

3.1 Nd:YAG 远程激光测距仪

Nd:YAG激光测距仪采用波长为1.06 μm 的近红外激光器作为光源,硅光电二极管或硅雪崩光电二极管作为探测器。主要优点是效率高、重复频率高、轻小、耗电少,并且在战术应用中近红外波段的激光具有较好的隐蔽性,因此得到迅速发展。

经过五十多年的发展,目前Nd:YAG远程激光测距仪已经较为成熟。早期的Nd:YAG远程激光测距仪多采用闪光灯作为激光器的泵浦光源。80年代后期,由于LD(激光二极管)技术的飞速发展,具有体积小、效率高、性能稳定、可靠性好、使用周期长、光束质量好等优点的LD泵浦的激光器很快代替了闪光灯泵浦的激光器^[17],成为远程激光测距仪的新型光源。如美国Hopkins应用物理实验室2000年研制的用于航天器上的远程激光测距仪就采用LD泵浦的Cr:Nd:YAG激光器,搭配扩展的红外

敏感雪崩光电二极管探测器和 7.62 cm 通光孔径 Dall-Kirkham 采集望远镜,其测程可达 327 km^[18]。MESSENGER 水星探测卫星所搭载的 MLA 激光测高仪(Mercury Laser Altimeter)采用二极管泵浦、调 Q Nd:YAG 激光器和硅雪崩光电二极管探测器,输出波长为(1064.30 ± 0.05) nm 的激光脉冲,其脉冲宽度是 6 ns(FWHM),脉冲能量为 20 mJ,脉冲重复率为 8 Hz,激光束发散角是 80 μrad^[19-20]。近年来,国内在航天系统和天体测量方面的超远程激光测距仪发展迅速。2016 年,由中国航天科技集团公司五院 508 所自主研发的我国首台对地观测激光测距仪(资源三号 02 星激光测距仪)在轨开机,其测距频率为 2 Hz,有效测距范围大于(520 ± 20) km^[21-22]。LD 泵浦的出现,使 Nd:YAG 激光测距仪更加小型化,全固化,这也是近年来远程激光测距仪一个非常重要的发展方向。如为了适应工程小型化,华中光

电技术研究所 2014 年研制了一种 LD 泵浦的 Nd:Ce:YAG 全固态激光测距仪,其工作频率可达 20 Hz,测程大于 20 Km,测距精度可达 ±1.5 m^[23]。江苏中科大港激光生产的脉冲激光测距机采用波长 1064 nm 激光,最远测距能力超 40 km,测距精度可达 1.5 m^[24]。

虽然 Nd:YAG 激光测距仪依靠其众多的优点已经广泛的应用在各个领域的远程测量上,但其缺点同样不可忽视。其缺点主要有:(1)对人眼有一定损伤,波长为 1064 nm 的激光远距离时对人眼的损伤虽不如近距离时那么严重,但仍然能使人眼致眩甚至致盲;(2)全天候测距能力差,Nd:YAG 激光器所产生的波长为 1064 nm 的激光位于红外线大气窗口外,因此其在大气中传播能力差;(3)军用系统兼容性差,1064 nm 的波长不能与 8~12 μm 波段内的典型热成像系统兼容。

表 1 国内外各种脉冲式远程测距仪性能指标

Tab.1 Performance indicators of various pulse remote rangefinders at home and abroad

年度	厂家及型号	主要用途	激光器	脉冲能量/mJ	最大重复频率/Hz	最大测程/km	精度/m
80 年代	英国 307 改进型	炮兵火控	CO ₂	未提及	1~2	20	±5
	美国 ALST 公司 ELRF	军事	钕玻璃	未提及	1	50	未提及
90 年代	美国 BIGSKY	光电火控系统	OPO	25	20	20	未提及
21 世纪前后	法国激光工业 TH304-08	光电火控系统	拉曼频移 Nd:YAG	未提及	20	40	±4.5
2000	美国约霍普金斯大学	航天测距	Cr:Nd:YAG	15.3	8	327	±6
2003	美国 NASA ICESat-GLAS	对地测高	Nd:YAG	75,32	40	未提及	0.15(平坦)
2004	美国 NASA MLA	水星测高	Nd:YAG	20	8	未提及	未提及
2014	华中光电技术研究所	工业、军事等	Nd:Ce:YAG	未提及	20	大于 20	±1.5
2014	湖北久之洋	光电跟踪系统	OPO	未提及	未提及	大于 20	±3
2015	江苏中科大港激光	多用	Nd:YAG	大于 300	10	大于 40	±1.5
2016	中国航天五院 ZY3-02	对地测高	Nd:YAG	200	2	大于 520 ± 20	±1(平坦)

3.2 CO₂ 远程激光测距仪

70 年代后期,随着 Nd:YAG 激光测距仪在使用中的缺点逐渐被重视,人们针对其缺点研制出了波长为 10.6 μm 的 CO₂ 脉冲激光测距仪。

CO₂ 脉冲激光测距仪具有对人眼安全、对大气的穿透能力强、与 8~12 μm 波段的热成像系统兼容、有较大的输出功率和能量转换效率等优点,所以在军事方面得到了一定的应用。如英国皇家信号和雷达研究院和弗郎蒂公司联合研制的 307 改进型远程 CO₂ 脉冲激光测距仪,激光重复频率为 1~2Hz,

发射功率达 600 kW,最远测距能力可达 20 km^[25]。

但 CO₂ 脉冲激光测距仪缺点同样明显,主要有^[26]:(1)需要低温致冷,探测 CO₂ 激光测距仪回波信号需要制冷的 HgCdTe 器件,并且需要特别设计的前置放大器用来克服噪声,因而增加了成本、体积和重量,这也是制约 CO₂ 激光测距仪大范围使用的主要原因;(2)波长为 10.6 μm 的激光反射率低,目标对 CO₂ 激光器发射的波长为 10.6 μm 的激光比波长为 1.06 μm 和 1.54 μm 的激光反射率低;(3)易被水分子吸收衰减,波长为 10.6 μm 的激光

极易被水分子吸收,当大气中水蒸气含量比较高时,特别是在雨雾天,极大地限制了其最远的测距能力。

3.3 1.5X μm 波长人眼安全远程激光测距仪

目前研制出的人眼安全激光测距仪虽然主要用于近程和中程测距,但在一些特殊场合(尤其是军用方面),国内外都研制出了一系列用于远程测距的人眼安全激光测距仪。在70年代末发展 CO_2 激光测距仪的同时,人们也对其他波长(1.54 μm , 1.73 μm , 2.1 μm 等)的人眼安全激光测距仪进行了研究。其中波长为1.5X μm 的激光因其具有对人眼安全,对大气、烟、雾穿透力强,对目标和背景有较高的对比度以及不需要低温制冷的探测器等优点,从而获得了广泛的应用^[27]。目前用于远程测距的1.5X μm 波长人眼安全激光器主要有:

(1) 直接输出1.5X μm 波长的固体激光器

直接输出波长为1.5X μm 的固体激光器主要以 Er^{3+} 掺杂材料为代表,利用 Er^{3+} 在1.5X μm 波段的谱线,主要包括钕玻璃激光器、掺钕光纤激光器以及其他掺钕晶体激光器。其中钕玻璃激光器的研究、应用最为广泛^[28]。

钕玻璃激光器采用掺入 Er^{3+} 离子的玻璃棒作为工作物质,采用闪光灯泵浦或LD泵浦,直接输出波长为1.54 μm 的激光。其结构紧凑,体积小,成本低。美国ALST公司ELRF系列的远程激光测距仪就是采用的钕玻璃激光器作为光源,其测程最远可达50 km,且能够在恶劣的战场环境下应用^[29]。但是钕玻璃属于三能级系统,激活粒子浓度低,受激辐射截面小,阈值高,转换效率低,重复频率低,且尚无合适的被动Q晶体,不适合高重复频率高输出的激光测距仪,所以一定程度上限制了其应用。

近年来,在其他掺钕晶体激光器和掺钕光纤激光器方面的研究也取得了一些进展,特别是光纤激光器的快速发展,使得掺钕光纤激光器也逐渐用在人眼安全远程激光测距仪上,但实际应用案例还不多,所以就不在此作一一介绍。

(2) 拉曼频移激光器

拉曼频移Nd:YAG激光器是在Nd:YAG激光器中放入高压甲烷气体盒(或氙气体等其他拉曼介质),通过受激拉曼散射(SRS),把1.06 μm 的激光波长频移到1.54 μm 。拉曼频移Nd:YAG激光器

和Nd:YAG一样结构紧凑,输出的拉曼频移激光脉冲宽度比Nd:YAG激光脉冲宽度窄,具有较好的光束质量,并且可在较高的重复频率下工作。但其需要在Nd:YAG激光器谐振腔中加装拉曼介质盒、反射镜等光学元件,因而结构复杂且价格较高,输出能量也不高,一般约20 mJ/pulse^[30]。如法国CILAS公司生产的THS304-06和THS304-08型人眼安全拉曼激光测距仪,其重复频率为20 Hz,工作距离可达40 km,精度为4.5 m^[31-32]。日本东京Nukui-kita通信研究实验室在2000年首次将拉曼频移皮秒Nd:YAG激光器应用在卫星激光测距上,实现了厘米级的精密人眼安全卫星激光测距^[33]。2007年,俄罗斯O. V. Kulagin等人展示了一种新的皮秒拉曼频移激光器,这种激光器能在大气湍流存在的情况下进行50 km的测距,精度为1 cm^[34]。

除了采用Nd:YAG激光器泵浦高压甲烷气体的拉曼频移激光器,近些年还发展出了基于 $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ 、Nd:YVO₄等材料的固体拉曼激光器,解决了高压气体作为转换介质所造成的激光重复频率低、体积较大、结构复杂等问题,但目前这些固体拉曼介质的应用还不够广泛^[28]。

(3) 光学参量振荡(OPO)激光器

光学参量振荡技术是利用具有一定功率密度的泵浦光作用于非线性晶体。当满足相位匹配条件时,产生信号光和闲频光,对信号光加以振荡放大,获得人眼安全的1.5X μm 波长输出。近些年,通过采用非线性系数大、破坏阈值高的优质非线性晶体,如KTP、BBO、KTA等,使得OPO的转换效率不断提升^[35]。目前最常用的方案是用氙灯或LD泵浦Nd:YAG晶体得到1.06 μm 的激光,以KTP晶体作为OPO介质,Ⅱ类非临界相位匹配,将波长为1.06 μm 的激光变换为1.57 μm 的人眼安全激光^[36]。OPO激光器的优点是输出波长可谐调,可高重复频率输出,但其光束质量较差,束散角一般在8 mrad以上^[37]。美国BIGSKY公司最先将OPO远程激光测距仪应用在光电跟踪及火控系统,其输出功率为25 mJ,激光重复频率为20 Hz,测程可达到20 km以上^[29]。2014年,湖北久之洋红外系统股份有限公司的贾泳等人研制的人眼安全远程OPO激光测距仪,具有多目标测距功能,工作距离达20 km以上^[38]。

目前这几种人眼安全激光测距光源相较于 Nd:YAG 激光器还存在许多不足,如阈值较高、激光

转换效率较低;此外,这几种不同的方案之间也存在优劣差异,如表 2 所示。

表 2 1.5X μ m 人眼安全激光器比较

Tab. 2 Comparison of 1.5X μ m human eye safety lasers

1.5X μ m 激光器	结构	转换效率	阈值	脉冲重复频率	光束质量
钕玻璃	一般	较低	高	低	好
SRS	复杂	较低	高	高	好
OPO	复杂	较低	高	高	较差

4 光子计数远程激光测距技术及其应用

对于远程激光测距,目前应用最多的脉冲式激光测距一般采用低重频、高能量的激光器作为光源配合大口径的望远镜。这导致远程激光测距系统具有体积大、重量大、耗电高、回波光子利用率低等明显缺点。并且传统的远程激光测距采用的线性探测体制,其反射回来的激光回波脉冲信号中包含了大量的光子能量,依靠较高的信噪比将回波脉冲信号从背景噪声中鉴别出来,但对于信噪比 $S/N < 1$ 的弱光回波信号,传统的激光测距系统所采用的探测体制已不适用^[39-40]。

为了达到更高的探测灵敏度、更远的探测距离和更大的数据采样率,国内外纷纷展开了对于各种新型激光测距技术的研究工作,光子计数激光测距技术便是其中之一。1997 年,英国赫瑞-瓦特大学的 J. S. Massa、G. S. Buller 等人首次将光子计数技术运用在距离深度信息测量中,1998 年,他们便首次研制出了基于光子计数技术(时间相关单光子计数技术)的激光测距仪^[41]。美国 NASA、MIT 林肯实验室等国外多家研究机构在光子计数激光测距领域也进行了多年的研究工作,并且研制成功了一些演示验证系统,展示了光子计数激光测距技术在远程测距方面的优势和潜力^[40]。如美国 NASA 21 世纪初研制的 SLR2000 型光子计数卫星测距系统,其望远镜光圈从上一代的 76 cm 减小到 40 cm,激光能量减少三个数量级(从 100 mJ 到 60 μ J),激光重复频率从 5 Hz 增加到 2 kHz^[42-43]。

光子计数激光测距技术是一种基于量子和统计理论的测距方法。通常采用高重复频率、低能量的激光器和灵敏度极高的单光子探测器(PMT 或 Geiger-mode APD),它将目标反射回来的弱光回波信号看作是离散的光子,记录下回波的光子个数,通过分

析回波光子数的统计特性得到目标的距离信息。光子计数测距法能够探测到光子级的回波信号,具有极高的灵敏度。而且测距结果是通过统计分析得到,能够有效克服噪声对测距的影响,抑制虚警率,提高测距精度^[44]。目前,与脉冲飞行时间激光测距相结合的时间相关光子计数测距技术已经运用在航天系统、天体测量及军用武器系统等领域。如美国 NASA 计划于 2018 年发射的 ICESat-2 所携带的激光测距(测高)系统,该系统采用两台波长为 532 nm 的微脉冲激光器搭配直径为 0.8 m 的望远镜和单光子探测器,激光重复频率为 10 kHz,发射后 ICESat-2 将首次在太空平台上实现光子计数激光测高^[45-46]。

近年来,国内一些高校及科研院所也对光子计数激光测距技术进行了研究并取得了一定的进展,但由于激光器以及探测器等技术方面的不足,仍与国外存在着一定的差距。2016 年,中国科学院上海光学精密机械研究所研制的光子计数远程激光测距系统采用 LD 双端面抽运腔内倍频的 Nd:YLF 调 Q 激光器搭配 PerkinElmer 公司的集成单光子计数模块(SPCM-AQRH-13),激光重复频率为 1 kHz,最远测距能力达 100 km 以上^[47]。2018 年,华东师范大学和北京空间力学与电力研究所展示了一种高速光子计数测距系统,其采用了 10 MHz 左右的三种不同重复频率的激光脉冲,测程可达 165 km^[48]。表 3 为国内外光子计数远程激光测距仪性能参数。

除了时间相关光子计数技术,2001 年哈尔滨激光技术研究所的褚贵福等人提出了用于微脉冲光子计数测距的光子计数法,是通过测量探测器所接收到的光子数与距离的关系得到目标的距离信息^[39]。2006 年中国科学院上海光学精密机械

研究所的赵栋等人提出了基于光子数目比较的激光测距法,是通过比较大量光子数目的方法求得待测距离^[49]。但目前这些方法还未研制出具体的验证演示系统。

表 3 国内外光子计数远程激光测距仪性能参数

Tab. 3 Performance parameters of photon counting remote laser range finder at home and abroad

年度	厂家及型号	用途	波长/ μm	脉冲能量/mJ	最大测程/km	重复频率/Hz
21 世纪初	美国 NASA SLR2000	卫星测距	未提及	0.06	未提及	2 k
2016	中科院上海光机所	未提及	0.526	15	100	1 k
2018	华东师范大学	地形测绘等	1.55	未提及	165	三种 10 M 左右
计划 2018	美国 NASA (ICESat-2)	对地测高	0.53	5~7	未提及	10 k

5 总结与展望

经过几十年的发展,远程激光测距已经取得了一定的成果,特别是脉冲式远程激光测距技术已经相当成熟并应用于军用系统、航天系统等领域。

今后人眼安全仍然是远程激光测距仪一个重要的研究方向,尤其是战术应用。如何提高人眼安全激光器的激光转换效率和如何简化比较复杂的系统结构等问题将是今后人眼安全激光测距仪的研究重点。全固化、小型化是远程激光测距仪一个重要的发展趋势,LD 泵浦技术和单光子器件的发展使测距仪的结构更加简单紧凑,体积更小。

光子计数激光测距技术已经在远程激光测距仪上展现出了一定的优势,尤其是对于 100 km 以上的远程测距。与脉冲式测距仪相比,光子计数激光测距仪体积小、功耗低,并且其微弱的回波信号本身就具有一定的人眼安全性。目前国内在单光子水平的激光测距研究大多还处于理论研究和模拟实验阶段,与国外快速发展的单光子激光测距技术还有一定的差距,并且在探测器性能和激光器性能方面也亟待提升,这些将是今后远程激光测距仪十分重要的研究方向和发展趋势。

此外,对于远程激光测距仪如何克服在恶劣环境下工作,如何适应战场需求,如何在无合作目标或漫反射目标的情况下实现远程高精度测距,如何对高重复频率回波信号进行处理及其算法和相关软件的开发都需要进行更加深入的研究。

参考文献:

[1] LIU Jiyu. The distance measurement evolution in 60 years [J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2010, 30 (2): 74-78. (in Chinese)
刘基余. 60 年距离测量的演变 [J]. 海洋测, 2010, 30

(2): 74-78.
[2] ZHANG Chunfeng, YANG Yi, LIU Chunhua. A multi-pulse based signal processing algorithm for airborne long-distance laser ranging [J]. Electronics Optics & Control, 2010, 17 (12): 29-33. (in Chinese)
张春风, 羊毅, 刘春华. 基于多脉冲的机载远程激光测距信号处理算法 [J]. 电光与控制, 2010, 17 (12): 29-33.
[3] YU Yanmei. Laser ranger and its development trend [J]. Command Control and Simulation, 2002, (8): 19-21. (in Chinese)
于彦梅. 激光测距机及发展趋势 [J]. 指挥控制与仿真, 2002, (8): 19-21.
[4] YANG Zhaojin. Introduction to laser measurement technology [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2017. (in Chinese)
杨照金. 激光测量技术概论 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2017.
[5] Markus Christian Amann, Risto A. Myllylae. Laser ranging: a critical review of unusual techniques for distance measurement [J]. Optical Engineering, 2001, 40 (1): 10-19.
[6] LI Xiuhua, ZHUANG Xin, SONG Liming. The survey of laser finding technique [J]. Journal of Changchun Institute of Technology: Natural Science Edition, 2012, 13 (4): 39-41. (in Chinese)
李秀华, 庄新, 宋立明. 激光测距技术探究 [J]. 长春工程学院学报: 自然科学版, 2012, 13 (4): 39-41.
[7] NI Xuxiang, HU Kai. Multi-pulse train cross-correlation method in remote laser ranging [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32 (11): 120-125. (in Chinese)
倪旭翔, 胡凯. 脉冲串互相关方法在远程激光测距中的应用 [J]. 光学学报, 2012, 32 (11): 120-125.
[8] HU Kai. Research on multi-pulse train cross-correlation

- technology in remote laser ranging [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013. (in Chinese)
- 胡凯. 远程激光测距中的脉冲串互相关技术研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [9] LONG Tengyu, HUANG Minshuang, SUN Liyan, et al. Single pulse laser correlation and accumulation method in remote laser ranging [J]. Journal of Beijing Institute of Petro-chemical Technology, 2013, 21 (3): 18 - 22. (in Chinese)
- 龙腾宇, 黄民双, 孙丽妍, 等. 单脉冲互相关累积法在激光脉冲远程测距中的应用 [J]. 北京石油化工学院学报, 2013, 21 (3): 18 - 22.
- [10] CHEN Huangfei, CHEN Yong, LI Yiyong, et al. Simulation of atmospheric transmission characteristic of laser 1.06 μm [J]. Laser Technology, 2014, 38 (2): 266 - 269. (in Chinese)
- 陈煌飞, 陈勇, 李怡勇, 等. 1.06 μm 激光的大气传输仿真研究 [J]. 激光技术, 2014, 38 (2): 266 - 269.
- [11] LIU Weichao, QI Linlin, HE Hongrang, et al. Numerical study on atmospheric transmission of 1.06 μm laser [J]. Laser & Infrared, 2011, 41 (5): 520 - 524. (in Chinese)
- 刘伟超, 齐琳琳, 何宏让, 等. 1.06 μm 激光大气透过特性的数值计算研究 [J]. 激光与红外, 2011, 41 (5): 520 - 524.
- [12] GENG Rui, CHEN Fangfang, LV Yong. Research on influencing factors of transmittance for laser transmission in atmosphere [J]. Laser Journal, 2016, (12): 13 - 17. (in Chinese)
- 耿蕊, 陈芳芳, 吕勇. 激光大气传输透过率影响因素研究 [J]. 激光杂志, 2016, (12): 13 - 17.
- [13] TAO Huirong. Effect of target properties on the non-cooperative laser ranging system [D]. Tianjin: Tianjin University, 2015. (in Chinese)
- 陶会荣. 无合作目标激光测距中目标特性对测量影响研究 [D]. 天津: 天津大学, 2015.
- [14] SUN Huayan, CHEN Jianbiao, ZHOU Zheshuai, et al. Influence of target scattering property on laser radar echo characteristics [J]. Laser & Infrared, 2018, 48 (5): 555 - 559. (in Chinese)
- 孙华燕, 陈剑彪, 周哲帅, 等. 目标散射特性对激光雷达回波特性的影响分析 [J]. 激光与红外, 2018, 48 (5): 555 - 559.
- [15] KANG Minqiang, DENG Ying, WANG Fang, et al. Discuss and design of picosecond laser pulse applied in long-distance ranging [J]. Advances in Laser and Optoelectronics, 2015, 52 (10): 241 - 245. (in Chinese)
- 康民强, 邓颖, 王方, 等. 皮秒脉冲激光远程测距应用探讨及系统初步设计 [J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52 (10): 241 - 245.
- [16] JIAN Li, QU Zhenling. New developments in laser ranging technology [J]. Modern Weaponry, 1993, (2): 34 - 38. (in Chinese)
- 简莉, 曲振玲. 激光测距技术的新进展 [J]. 现代兵器, 1993, (2): 34 - 38.
- [17] GENG Aicong. Solid-state lasers and their applications [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2014. (in Chinese)
- 耿爱丛. 固体激光器及其应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2014.
- [18] Cole T D. Flight characterization of the Near laser rangefinder [J]. Proc SPIE, 2000: 131 - 142.
- [19] LIU Jiayu. Satellite-borne laser altimeter from earth surveying to mercury exploration [J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2017, (4): 1 - 8. (in Chinese)
- 刘基余. 从对地观测到水星探测的星载激光测高 [J]. 遥测遥控, 2017, (4): 1 - 8.
- [20] Solomon S C, Jr M N, Gold R E, et al. The MESSENGER mission to Mercury: scientific objectives and implementation [J]. Planetary & Space Science, 2001, 49 (14): 1445 - 1465.
- [21] WANG Chunhui. The first on-orbit observation laser range finder in China [J]. Dual Use Technologies & Products, 2016, (15): 15. (in Chinese)
- 王春辉. 我国首台对地观测激光测距仪在轨开机 [J]. 军民两用技术与产品, 2016, (15): 15.
- [22] ZHANG Guo, LI Shaoning, HUANG Wenchao, et al. Geometric calibration and validation of ZY3-02 satellite laser altimeter system [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2017, 42 (11): 1589 - 1596. (in Chinese)
- 张过, 李少宁, 黄文超, 等. 资源三号 02 星对地激光测高系统几何检校及验证 [J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2017, 42 (11): 1589 - 1596.
- [23] SHI Lei. Design of an all-solid-state laser rangefinder with a diode-pumped laser [J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2014, 12 (3): 72 - 75. (in Chinese)
- 石磊. 半导体泵浦全固态激光测距仪的研制 [J]. 光学与光电技术, 2014, 12 (3): 72 - 75.
- [24] ZHOU Yu. Research and design of pulsed laser range finder [D]. Wuhan: Central China Normal University,

2016. (in Chinese)
- 周宇. 脉冲式激光测距仪的研究与设计[D]. 武汉: 华中师范大学, 2016.
- [25] TAN Xianyu. Development trend of military laser rangefinders at home and abroad [J]. Infrared and Laser Engineering, 1991(3): 6–13. (in Chinese)
- 谭显裕. 国内外军用激光测距仪的发展动向[J]. 红外与激光工程, 1991(3): 6–13.
- [26] ZHAO Yu. Application of CO₂ laser in laser rangefinder [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2006, 27(5): 17–19. (in Chinese)
- 赵宇. 二氧化碳激光器在激光测距机中的应用研究[J]. 兵器装备工程学报, 2006, 27(5): 17–19.
- [27] JIN Feng, GONG Mali. Design considerations for 1.5X μ m eye-safe laser rangefinders [J]. Journal of Optoelectronics Laser, 1998(5): 439–441. (in Chinese)
- 金锋, 巩马理. 1.5X μ m 人眼安全激光测距技术设计[J]. 光电子·激光, 1998(5): 439–441.
- [28] TANG Xiaohui. An eye-safe E-O ceramics Q-switched Er: glass laser [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2009. (in Chinese)
- 汤晓晖. 使用电光陶瓷主动调Q的钕玻璃眼安全激光器[D]. 上海: 上海交通大学, 2009.
- [29] LU Changyong, WANG Xiaobing, GUO Yanlong, et al. Principle and evolution of 1.5X μ m wavelength eye-safe military laser rangefinder [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2005, 42(3): 32–35. (in Chinese)
- 卢常勇, 王小兵, 郭延龙, 等. 1.5X μ m 波长人眼安全的军用激光测距机及其进展[J]. 激光与光电子学进展, 2005, 42(3): 32–35.
- [30] HUO Yujing, YANG Chengwei, CHEN Qiansong. Review on development of laser sources in pulsed rangefinder [J]. Laser & Infrared, 2002, 32(3): 131–134. (in Chinese)
- 霍玉晶, 杨成伟, 陈千颂. 脉冲激光测距光源进展[J]. 激光与红外, 2002, 32(3): 131–134.
- [31] XU Xiang. The study of multifunctional laser ranging finder system [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2006. (in Chinese)
- 许翔. 多功能激光测距系统研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2006.
- [32] LE Tian. Naval laser rangefinder [J]. Modern Military, 2002, (6): 15–16. (in Chinese)
- 乐天. 海军用激光测距仪[J]. 现代军事, 2002, (6): 15–16.
- [33] Kunimori H, Greene B, Hamal K, et al. Centimetre precision eye-safe satellite laser ranging using a Raman-shifted Nd:YAG laser and germanium photon counter [J]. Journal of Optics A: Pure & Applied Optics, 2000, 2(1): 1–4 (4).
- [34] O V Kulagin, M Valley. Picosecond eye-safe Raman laser for advanced ranging and tracking [J]. Proc Spie, 2007: 67080Y–67080Y–14.
- [35] WANG Guchang, SUN Bin, WAN Qiang, et al. A survey of military pulsed laser rangefinding technology [J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2003, 1(4): 55–59. (in Chinese)
- 王古常, 孙斌, 万强, 等. 军用脉冲激光测距技术与研究现状[J]. 光学与光电技术, 2003, 1(4): 55–59.
- [36] ZHANG Shanchun, ZHANG Peng, LI Yeqiu, et al. The study of optical parametric oscillation solid laser [J]. Journal of Shenyang Ligong University, 2018, 37(1): 1–3. (in Chinese)
- 张善春, 张鹏, 李业秋, 等. 光参量振荡固体激光器研究[J]. 沈阳理工大学学报, 2018, 37(1): 1–3.
- [37] ZHANG Wei. Research on 1.57 μ m eye-safe laser [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2008. (in Chinese)
- 张巍. 人眼安全 1.57 μ m 激光器研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2008.
- [38] JIA Yong, GAO Yanwei, LIN Xingtai, et al. Development of compact eye-safe laser rangefinder module [J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2014, 12(6): 45–47. (in Chinese)
- 贾泳, 高彦伟, 林兴泰, 等. 人眼安全激光测距模组紧凑化设计技术[J]. 光学与光电技术, 2014, 12(6): 45–47.
- [39] CHU Guifu, SUN Fuxing, DAI Yongjiang. The method of photon count and its application on the micro-pulse laser range-finding [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2001, 12(8): 860–863. (in Chinese)
- 褚贵福, 孙复兴, 戴永江. 光子计数法及其在微脉冲激光测距中的应用[J]. 光电子·激光, 2001, 12(8): 860–863.
- [40] HOU Libing, HUANG Genghua, KUANG Yaowu, et al. Research of photon counting laser ranging technology [J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13(18): 5186–5190. (in Chinese)
- 侯利冰, 黄庚华, 况耀武, 等. 光子计数激光测距技术研究[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(18): 5186–5190.

- [41] CHEN Yunfei. Design and implementation of photon counting laser ranging system[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2014. (in Chinese)
陈云飞. 光子计数激光测距系统设计与实现[D]. 南京: 南京理工大学, 2014.
- [42] John J Degnan. Present and future space applications of photon-counting lidars[J]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2009, 726(12): 73230E-73230E-12.
- [43] Isyanova Y, Wall K F, Flint J H, et al. SLR2000 laser transmittern 2002[J]. 2014.
- [44] TIAN Yuzhen, ZHAO Shuai, GUO Jin. Analysis of non-cooperative target photon counting laser ranging[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(5): 138-145. (in Chinese)
田玉珍, 赵帅, 郭劲. 非合作目标光子计数激光测距技术研究[J]. 光学学报, 2011, 31(5): 138-145.
- [45] Markus T, Neumann T, Martino A, et al. The Ice, cloud, and land elevation Satellite-2 (ICESat-2): science requirements, concept, and implementation[J]. Remote Sensing of Environment, 2017, 190: 260-273.
- [46] McGill M, Markus T, Scott V S, et al. The Multiple altimeter beam experimental lidar (MABEL): An airborne simulator for the ICESat-2 mission[J]. Journal of Atmospheric & Oceanic Technology, 2013, 30(2): 345-352.
- [47] LUO Yuan, HE Yan, GENG Liming, et al. Long-distance laser ranging lidar based on photon counting technology[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016(5): 239-246. (in Chinese)
罗远, 贺岩, 耿立明, 等. 基于光子计数技术的远程测距激光雷达[J]. 中国激光, 2016(5): 239-246.
- [48] Du B, Pang C, Wu D, et al. High-speed photon-counting laser ranging for broad range of distances[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1).
- [49] ZHAO Dong, LIU Liren, WANG Jiming, et al. A laser ranging method based on photon statistics[J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(7): 1091-1096. (in Chinese)
赵栋, 刘立人, 王吉明, 等. 基于光子数目比较的激光测距法[J]. 光学学报, 2006, 26(7): 1091-1096.