

军用脉冲激光测距技术与研究现状

王古常 孙斌 万强 程勇

(武汉军械士官学校光电技术研究所 武汉 430075)

摘要: 简要介绍了军用脉冲激光测距机的工作原理和应用现状, 分析了脉冲激光测距机中各种激光源的优缺点, 并对现阶段军用脉冲激光测距机的研究热点和未来的发展趋势作了相应阐述。

关键词: 脉冲激光测距机; 人眼安全; 半导体泵浦; 免调试固体激光器

中图分类号: TH745.3 文献标识码: A

上依赖于激光测距技术的发展。

1 引言

激光出现以后, 就开始了激光的军事应用, 其中, 激光测距机是激光技术在军事领域应用的成功典范。由于具有良好的方向性和单色性, 所以与微波等其他测距方法相比, 激光测距具有方向性好、测距精度高、测程远、抗干扰能力强、隐蔽性好等优点, 并因此在军事领域得到了广泛应用。作为现代军事侦察技术和距离探测设备的重要技术之一, 脉冲激光测距技术对提高防空、海上作战、中远程精确打击及陆上武器攻击的命中精度方面已起到了关键作用, 可以说, 未来武器系统的发展及其命中精度的提高将在很大程度

2 脉冲激光测距机的军事应用及性能特点

脉冲激光测距机作为军用装备器材, 发展于 60 年代初。经过 40 多年的开发、研制和装备, 国内外装备量最大的是以 Nd:YAG 为器件的固体脉冲激光测距机, 而喇曼频移 Nd:YAG、OPO 光参量振荡和铟玻璃以及 CO₂ 脉冲激光测距机, 虽已少量装备部队, 但仍是近年来军用脉冲激光测距技术的研究热点。典型军用脉冲激光测距机的技术性能如表 1 所示。

Table 1 Technical function of typical military pulsed laser rangefinders

性能	红宝石	Nd:YAG	CO ₂	喇曼频移 Nd:YAG	铟玻璃	OPO
波长(μm)	0.694	1.06	10.6	1.54	1.54	1.57
激光器类型	固体(晶体)	固体(晶体)	气体	固体或气体波长转换	固体(玻璃)	非线性晶体频率转换
激励方式	闪光灯	闪光灯或激光二极管	放电	闪光灯或激光二极管	闪光灯或激光二极管	闪光灯或激光二极管
脉冲能量(mJ)	10~50	10~100	10~100	10~30	10~30	10~30
脉宽(ns)	2~50	8~20	20~100	6~15	20~30	5~15
重复频率(Hz)	单次	单次~20	1~50	单次~30	单次	单次~30
探测器类型	Si APD	Si APD	制冷 PV HgCdTe	InGaAs APD 或 PIN	InGaAs APD 或 PIN	InGaAs APD 或 PIN
典型的人眼安全等级	IV级 不安全	IIIb 到IV级 不安全	基本上在IIIa 级 安全	I 到IIIa 级 安全	I 到IIIa 级 安全	I 到IIIa 级 安全

收稿日期: 2003-05-29; 修改稿日期: 2003-06-13

作者简介: 王古常(1967-), 男, 讲师, 国防科技大学硕士研究生, 现从事激光测距方面的研究工作。

2.1 红外红宝石脉冲激光测距机

0.694 μm 的红外红宝石脉冲激光测距机是最早问世的军用激光测距机, 20 世纪 70 年代初开始装备部队。由于工作波长属红色可见光, 极易暴露目标, 加上效率低、体积和重量大、耗电多、对人眼极不安全等缺点, 很快便被 Nd:YAG 激光测距机取代, 目前除少数应用外已被淘汰。

2.2 Nd:YAG 脉冲激光测距机

Nd:YAG 激光测距机采用发射 1.06 μm 近红外钕激光器 (主要是 Nd:YAG 激光器, 少数为钕玻璃激光器) 和硅光电二极管或雪崩光电二级管探测器, 主要优点是隐蔽性好、效率高、轻小、耗电少, 因此小型化研制进展迅速。1977 年美国研制成功称之为 AN/GVS-5 型的第一个手持使用的小型 Nd:YAG 激光测距机, 该机的外形结构首次采用了适宜手持使用的双目望远镜式结构, 大小与一具标准的 7 \times 50 军用双目望远镜相当, 总重量仅 2kg。该机在设计上采用组件结构, 在技术上首次成功采用轻小、成本低、不耗电的 BDN 被动染料片 Q 开关和工作电压为 350V 的低压硅雪崩光电二级管探测器, 用大规模集成电路实现接收电路的固体组件化。此后, 应用 AN/GVS-5 的研制成果, 很多国家都相继研制成类似于 AN/GVS-5 的各种型号的手持激光测距机装备部队, 如挪威研制和英国改进生产的 LP7 型被确定为北约部队的正式装备仪器。由于这些低成本、小型手持激光测距机的研制成功, 从 20 世纪 70 年代末到 80 年代中, Nd:YAG 激光测距机进入了大批生产和广泛应用阶段, 目前装备量已扩大到陆、海、空三军, 并仍在以下几方面广泛应用^[2]。

(1) 战场指挥员、步兵侦察员、炮兵前沿指挥观测员以及舰队基地指挥员、海军陆战队员用手持瞄准观察和测距;

(2) 现代作战坦克和装甲车采用 Nd:YAG 脉冲激光测距机作为火控系统的重要部件, 用以改善主要作战武器的精度;

(3) 广泛用于对空防御系统, 提高对抗高速飞机和机动性大的武装直升机的跟踪精度;

(4) Nd:YAG 激光测距仪和激光目标指示器是国外应用最早的激光武器。目前, 这种武器系统仍然是激光制导炸弹、导弹和火炮的唯一远距离精确制导武器, 并为双功能激光测距和激光目标指示器采

用人眼安全的喇曼频移 Nd:YAG 激光器实现精确制导打下了基础。

Nd:YAG 激光测距机的主要缺点有:

(1) 对人的眼睛损伤较大。Nd:YAG 激光测距机发出的 1.06 μm 激光通过人眼被聚焦在视网膜上, 在近距离能使人眼致盲, 在远距离时能使人眼致眩, 因而给训练和试验带来了很大的困难;

(2) 全天候测距能力低。3~5 μm (中红外线) 波长域和 8~14 μm (远红外线) 波长域, 是红外线的两个大气窗口, 而 Nd:YAG 激光测距机产生的激光波长不位于红外线大气窗口的波长域内, 因此其在大气中的传播能力低, 易受干扰。在有雾、霾的气象条件下和战场烟尘的环境中, 不仅测距的精度和质量不能保证, 甚至根本无法实施测距。这意味着该激光测距机受能见度的影响很大, 降低了主战坦克的全天候作战能力;

(3) 兼容性差。我国新型主战坦克 WZ123 车已装备了热成像仪, 为了提高装甲兵的夜战能力, 今后必将大量装备热像仪。由于热成像仪的工作波段是 8~12 μm , 故 1.06 μm 的 Nd:YAG 激光测距机与其兼容性差。因为它们工作在不同的波段, 所以不仅不能实现部件和元件的共用, 而且用热像仪能观察到的目标, 不一定能用 Nd:YAG 激光测距机测到它的距离 (因为热成像仪具有较强的穿透烟、雾、雪、尘埃的能力, 而 Nd:YAG 激光测距机的穿透能力则较低)。

3 研究热点及发展趋势

近 20 年来, 军用脉冲激光测距机的改进主要集中在人眼安全、应用二极管泵浦技术、提高稳定性和可靠性等方面。人眼安全是今后激光测距机的发展趋势, 其中, CO₂ 激光测距机因在获得人眼安全的同时, 能与热成像仪兼容而受到重视; 1.5 μm 激光测距机以它的优越性而成为人眼安全激光测距机的研究热点。20 世纪 80 年代出现的激光二极管泵浦 (DPL) 技术, 可使固体激光器的效率提高 4 倍, 使电源和冷却系统的质量减少 75%, 因而也已成为当今军用脉冲激光测距技术中的研究热点之一。在提高激光测距机的机械稳定性、热稳定性和可靠性等方面, 棱镜谐振腔激光器得到高度重视, 如美国 AN/AVQ-25 型机载激光测距机就采用了正交玻璃棱镜腔激光器; 在国内, 采用定向棱镜谐振腔的免调试固体激光器, 因为结构简单, 并具有

抗失调、压缩发散角和改善光束质量等优异特性, 因而在军用激光测距领域也引发了新一轮研究热潮。

3.1 CO₂脉冲激光测距机

CO₂脉冲激光测距机是20世纪80年代主要针对1.06 μm的Nd:YAG激光测距仪的缺点发展起来的新一代人眼安全激光测距机。其主要优点有:

(1)传输能力强。CO₂激光测距机的工作波长是10.59 μm, 该波长正好位于8~14 μm的远红外线大气窗口, 故其大气传输性能好, 透过大气雾、霾和战场烟尘的能力强, 能见度对其影响很小。

(2)对人眼安全。中小功率的CO₂激光器的10.59 μm波长远离眼睛的透射波长(可见光和近红外波段), 它由角膜吸收, 不损伤视网膜, 因而不会损伤或致盲受到照射的人眼, 在训练与演习中不受安全性的限制, 不必配带防护镜和在仪器内加装防护滤光片。

(3)与热像仪(工作波长)8~12 μm兼容性好。CO₂激光测距机与热像仪可以共用光学系统、扫描系统、接收机和电源, 从而使组合系统结构紧凑, 体积缩小, 重量减轻, 成本降低。此外, 它们在性能上也相容。

(4)效率高。Nd:YAG效率一般为1~3%, 最高不超过5%, 而CO₂激光器的效率一般为10~20%, 高的可达25%, 从而可减小整机的重量和体积。

目前, 世界上战技性能先进的主战坦克, 已装备了CO₂激光测距机。如美国的M1A1、M1A2, 韩国的88式, 英国的“挑战者”2等等, CO₂坦克激光测距机的良好性能在海湾战争中得到了充分的验证, 可以预测, CO₂激光测距机将和Nd:YAG激光测距机一起, 成为军用激光测距领域的主要装备。

然而, CO₂激光测距机同样存在制约其发展的若干因素, 主要包括:

(1)10.6 μm的CO₂激光波长极易被水分子(H₂O)吸收衰减, 在大气中含水蒸汽密度大的晴天和潮湿条件下, 限制了它的最大测距能力, 特别是雨天和目标被冰雪覆盖时, 目标呈现多镜面对称反射, 对CO₂激光波长测距不利。

(2)10.6 μm的CO₂激光波长的反射率较低, 对战术目标的反射系数低于1.54、1.06和0.69 μm的激光波长。

(3)探测CO₂激光需用制冷的HgCdTe器件, 这些器件都要在低温下工作, 并需要特别设计的前置

放大器, 以克服噪声。

以上缺点加大了CO₂激光测距系统的复杂性和成本, 使得CO₂激光测距机难以手持使用。因而, CO₂激光测距机的发展方向是减小体积和重量、降低成本、与热像仪合一。

3.2 1.5 μm波段人眼安全脉冲激光测距机

1.5 μm波段波长激光由于具有对人眼最安全, 大气穿透能力强, 目标反射系数高, 并且对应于室温下工作、不需要制冷的Ge或InGaAs探测器的探测灵敏区等优点而在人眼安全激光测距机中获得了广泛的应用。产生1.5 μm波段激光主要有以下三个途径^[3]:

(1)直接输出1.5 μm波段波长的固体激光器

比较成熟的是钕玻璃激光器, 这也是1.5 μm波段测距常用的激光器。钕玻璃激光器采用掺入Er³⁺离子玻璃激光棒, 并用闪光灯泵浦, 产生1.54 μm激光。其主要优点是: 1.54 μm波长的激光对人眼的安全性最高; 可以使用普通光学材料的透镜、棱镜、窗口、分束镜等, 因而器件结构紧凑, 体积小, 成本低, 适用于地面目标测距(如手持式或车载激光测距等)。缺点是: 阈值高, 输出能量低, 寿命短; 钕玻璃材料制作困难; 并且受基质玻璃材料低导热系数的限制, 激光器重复工作频率低, 不适合高重复频率的应用(如对空防御等); 目前还没有适用的被动染料Q开关, 因而带来了转镜Q开关的很多缺点。钕玻璃脉冲激光测距机的发展方向是降低阈值, 提高效率, 研制适用的被动染料Q开关。

(2)喇曼频移Nd:YAG激光器

喇曼频移Nd:YAG激光器是在Nd:YAG激光器中放入高压甲烷(CH₄)气体盒(或氙气体等其他喇曼介质), 通过受激喇曼散射, 把1.06 μm的激光波长频移到1.54 μm。主要优点有: 可利用现有的Nd:YAG激光器, 被动染料Q开关与光学元件; 输出的喇曼频移激光脉冲的宽度比Nd:YAG激光脉冲窄, 因而具有较好的光束质量, 可在较高的重复频率下工作, 研制成功后, 可用于步兵和炮兵前沿侦察及对重复频率要求较高的舰载或防空火控系统中。主要缺点是: 伴随着受激喇曼散射会产生其他的非线性效应, 降低喇曼转换效率; 要考虑高压喇曼气体介质的泄漏问题和喇曼盒在聚焦光学系统中光学窗的损坏问题; 在Nd:YAG激光器的谐振腔中要增加喇曼盒、反射镜、透镜等光学元件, 结构复杂, 输出能量也不高, 一般约20 mJ/pulse。

根据以上缺点可以预见,喇曼频移 Nd:YAG 激光测距机的发展方向是提高喇曼转换效率,用固体喇曼介质代替气体喇曼介质,用半导体激光器代替 Nd:YAG 激光器中的闪光灯。Eugene V. Raevsky 等人在 2000 年 SPIE 会议上报道了一种新型的用于人眼安全激光测距仪的喇曼频移激光器,它是在单块 Nd:KGW (Nd:KGd (WO₄)₂) 晶体上实现了二极管泵浦喇曼频移激光器。Nd:KGW 晶体既是激光晶体又是喇曼介质。通过受激喇曼散射,将 1.351 μm 波长的激光频移到 1.538 μm。

(3) Nd:YAG 泵浦的参量振荡激光器

OPO (Optical Parametric Oscillators) 激光器采用 KTP 晶体 II 类非临界相位匹配,输出 1.57 μm 波长的激光。人眼安全 1.57 μm OPO 激光器是从 80 年代末开始研究并得到迅速发展的,颇受军方重视。美国 Schwartz 光电公司 OPO 器件已达 500 mJ/pulse, Lockheed Sanders 公司研制了二极管泵浦全固化 1.57 μm 手持式人眼安全激光测距机。国内,西南技术物理研究所于 1998 年底研制成功国内首台 1.57 μm OPO 人眼安全激光测距机。该 OPO 激光器选用水冷 LiNbO₃ 电光调 Q 1.0641 μm (Ce, Nd):YAG 激光器作为泵浦源,获得 12 mJ/pulse、1.57 μm OPO 激光输出,脉冲宽度 ~6 ns,束散角 ~8 mrad,重复频率为 1 Hz, 12.5 Hz, 20 Hz 可调。测距机选用常温下工作、带前置放大器的 InGaAs-PIN 探测器组件,测量范围 200 m ~ 7.05 km,测距精度 ±5 m。

OPO 器件的优点是可高重复频率运转,波长可调谐,缺点是光束发散角较大,适合用于要求较高重复频率的舰载或防空光电火炮系统。今后的研究重点将是减小束散角。

虽然 1.5 μm 波段激光对人眼安全具有独特的优越性,但 1.5 μm 波段激光测距机仍存在激光器能量转换效率低,脉冲能量小,重复频率不是很高,不能与 8 ~ 12 μm 热成像系统兼容等缺点。此外,Ge 和 InGaAs 探测器的探测灵敏度和响应度都不如 Nd:YAG 激光测距仪用的 Si-APD,因而接收电路需要设计专门的低噪声前置放大组件。这些都限制了 1.5 μm 波段激光测距机的广泛应用,也对我们发展 1.5 μm 波段激光测距机提出了挑战。

3.3 半导体泵浦激光测距机

除研制人眼安全的激光测距机外,研究工作还集中在研制具有较高效率的固体激光测距机上。现有的激光测距机几乎都是采用闪光灯泵浦,其缺点

是效率低、寿命短、体积不能做得太小。80 年代中期出现的激光二极管泵浦 (DPL) 技术为提高固体激光测距机效率提供了研究途径。激光二极管的工作波长一般在 810 ~ 950 nm 之间,与 Nd:YAG 激光晶体的峰值吸收线的光谱匹配性能极好,两者的光耦合效率理论上可达到 100%,而闪光灯与 Nd:YAG 激光晶体的光耦合效率仅 20%,从而提高了激光器的整体效率^[4]。这一优异特性,使得半导体泵浦固体激光器同传统闪光灯泵浦的固体激光器相比,有许多不可比拟的优点:(1) 效率高,对电源功率要求低,机械震动小;(2) 寿命长,易于操作和维护;(3) 体积小,重量轻,便于携带等等。同时,半导体激光器价格的不断下降,也促使半导体激光器泵浦的固体激光器的研究愈来愈广泛和深入,并在九十年代从实验室阶段走上产业化和商品化的阶段^[4]。

然而,尽管半导体泵浦的固体激光器在理论和技术上都已经达到了相当成熟的地步,但在具体的细节问题上尚存在困难须深入研究。例如激光器的工作物质的热效应,光光转换效率,倍频激光的稳定性,激光器的光束质量,激光器的优化设计,产品的成本和加工制作的可行性等。这些问题的研究对半导体泵浦的固体激光器的产业化将具有重要的指导意义和实用价值。预计,未来 DPL 激光测距技术的研究将集中在提高激光器的效率方面,同时还研究用相位共轭技术提高激光束的质量,减小光束发散角和激光器尺寸,以期研制出小型化、固体组件化和更高功率的 DPL 激光测距系统。

3.4 免调试技术在军用脉冲激光测距系统的应用

军用激光测距机通常工作在高振动和高温度冲击等恶劣战场环境下,振动、撞击、温度突变或因打开腔体修理等,都会导致激光器失调,加上传统的平行平面腔 Nd:YAG 固体激光器调试精度要求高、装调困难等缺点,使得激光测距机的实战能力受到严重影响。因此,提高军用固体激光器的机械稳定性和热稳定性,是激光测距系统中亟待解决的技术难题和重要研究课题之一。1998 年,武汉军械士官学校光电技术研究所多年从事测距机修理的基础上,发明的免调试固体激光器从根本上解决了这一难题。

免调试固体激光器的核心技术是采用定向棱镜(也称角锥棱镜)谐振腔,其结构特征是在激光棒一端放置定向棱镜作为全反镜,另一端放置平面或平凹输出镜,也可直接镀膜作为输出镜构成免调试

谐振腔^[5]。定向棱镜具有入射光线沿原方向返回的独特性能,这一性能使得免调试激光器在获得理想光束质量的同时,具有极强的抗失调能力,实现激光器安装后不经调试即可正常工作的独特功能,具有免维护,便于维修的优点,大大提高了激光装备的维修保障能力和战场再生能力。同时,免调试激光器结构简单、安装方便、性能可靠、便于维修保养、寿命长,因而容易对相关的激光设备进行改装,且成本低,可形成标准化、组件化产品。

免调试技术在激光测距机中最成功的应用推动了小型重频免冷却激光器的发展。随着车载、舰载、机载、高炮等火控系统的发展,对目标要能实时跟踪和定位,这就要求激光测距机能够连续不断对移动目标进行测距,通常测距频率为3~5Hz,持续工作30s以上。因此,激光器的冷却问题成为关键。通常的水冷和风冷方式,存在体积大、可靠性差、维护要求高等缺点,已逐渐趋于淘汰。采用定向棱镜腔、双掺激光晶体、热传导冷却等技术获得的小型重频免冷却激光器,在5Hz情况下可连续工作1min,输出能量50mJ以上,光束质量好和光轴近乎零漂移的理想效果^[6]。该激光器一经问世,便在机载激光目标指示器、高炮对空指挥镜、侦察指挥车、自行火炮、舰载火控系统等多种新型装备中使用,已成为该类型装备最理想的小型固体激光器件。

目前,免调试技术正在喇曼频移激光器、OPO激光器^[7]、DPL激光器^[8]和气体激光器中开展应用研究,预计有替代现行激光器的应用前景,并将在

军用脉冲激光测距系统的新品预研和设计定型中发挥越来越重要的作用。

参考文献:

- [1] 军用脉冲激光测距仪的发展和应用, <http://www.photics.net>, 激光技术.
- [2] Huo Yu-jing, et al. Review on Development of Laser Sources in Pulsed Rangefinder. *Laser and Infrared*, Vol.32, No.3.
- [3] 张承铨, 国外军用激光仪器手册, 第一版, 兵器工业出版社, 1989, 50-51.
- [4] 刘伟仁, 钱龙生, 余锦, LD泵浦的紧贴式产业化固体绿激光器的研究, *光学精密工程*, 1999年第2期.
- [5] Shaomin Wang, et al. Corner cube recognized as super-conjugator, *SPIE 2002 Vol4914*, 182-187.
- [6] 程勇, 孙斌, 王小兵等, 光轴零漂移的热传导冷却重复频率激光器研究, *中国激光*, 2002, Vol.A29, No.6, 495-497.
- [7] Y.Cheng, F.Z.Ding, et al. Fine OPO solid state with heat-conductive cooling element. *SPIE 2002*, Vol.4913, 306-310.
- [8] 程勇, 陈波, 王小兵等, 定向棱镜谐振腔半导体泵浦固体激光器, 2003(武汉)激光技术应用与产业发展论坛论文集, 60-63.

A Survey of Military Pulsed Laser Rangefinding Technology

WANG Gu-chang SUN Bin WAN Qiang CHENG Yong

(Facility of Opto-Electronics, Wuhan Ordnance Noncommissioned Officers School, Wuhan 430075, China)

Abstract: In this paper, principle and applications on military pulse laser rangefinder are introduced. The advantages and disadvantages of laser sources in pulse rangefinder are analyzed. The hot-issues and tendency of military pulse laser rangefinder are expatiated as well.

Key words: pulse laser rangefinder; eye-safe; diode-pumped; adjustment-free solid-state laser