

# 基于相干探测技术的远程激光雷达

董光焰 潘静岩 张鹏飞

(中国电子科技集团公司第二十七研究所, 郑州 450047)

**摘要:** 设计了一种基于相干探测技术的远程激光雷达,采用全光纤化系统设计方案,实现了系统的小型化。介绍了远程激光雷达系统的组成、原理和外场试验。测试结果表明,在100 km大气能见度条件下,采用20 μJ脉冲能量下激光雷达能够实现85.59 km距离的山体测量,验证了基于相干探测技术的远程激光雷达具有优良的探测性能,为远距离激光测距雷达的研制奠定了基础。

**关键词:** 相干探测;激光技术;远程测距

中图分类号: TN958.98 文献标志码: A 文章编号: 1004-7859(2018)06-0001-04

## Long-distance Lidar Based on Coherent Detection Technology

DONG Guangyan, PAN Jingyan, ZHANG Pengfei

(The 27<sup>th</sup> Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Zhengzhou 450047, China)

**Abstract:** Based on coherent detection technology, a miniature long-distance lidar with all-fiber signal transmission is designed. Components, principle and field experiment of the lidar system are introduced. The result shows that when the atmospheric visibility is about 100 km, the maximum detecting range 85.59 km (for a mountain) can be realized with 20 μJ pulse energy laser, excellent performance of the lidar is demonstrated. A foundation is established for the development of long-distance lidar.

**Key words:** coherent detection; laser technique; long-distance ranging

## 0 引言

要实现百千米甚至上千千米目标的远距离测量,激光雷达多采用高能量的激光脉冲、大口径的光学天线,从而导致激光雷达系统体积大、重量大、功耗高<sup>[1]</sup>,尤其不利于机载、星载等平台的安装和使用。基于相干探测技术的激光雷达具有非常高的探测灵敏度,大大降低了激光发射机的脉冲能量和光学天线的接收口径,从而使得激光雷达系统具有体积小、重量轻、功耗低的优势,在远程目标探测方面成为一个重要的研究方向。国内相关单位均开展了该方向的研究工作<sup>[2]</sup>。

基于相干探测技术的激光雷达在国外开展得较早,大部分集中于大气风场等软目标探测方面的研究<sup>[3-6]</sup>。在硬目标探测方面,美国MIT林肯实验室利用“火池”激光雷达,实现了144 km Wallops岛的探测,并对真假弹头的探测距离达到700 km~1 500 km。美国国防高级研究计划局和美国国防部中小企业创新计划资助课题采用高灵敏度的相干激光传感系统对中段导弹目标进行实时模拟,包括距离和多普勒信号的测量,激光传感器的波长响应范围为1 064 nm~1 550 nm,脉冲的返

回测距精度为10 ps,调制带宽为2 GHz,入射脉冲的编码为100 ms,对导弹中段探测目标的距离为450 km。美国SPARTA公司在距离多普勒成像技术的基础上,又进一步利用伪随机相位调制技术获取一种卫星角反射器的距离多普勒激光雷达像,探测距离达770 km<sup>[7]</sup>。国内受到器件技术水平的制约,在远程目标探测方面还处于试验阶段。

针对远距离目标探测的应用需求,在国产化单频激光器发展的基础上,设计了一款基于相干探测技术的全光纤化远程激光雷达。本文介绍了相干探测技术的基本原理,分析了激光雷达大目标探测能力,比较了激光雷达与常规直接探测体制激光测距机的探测灵敏度,并通过外场试验验证了激光雷达的实测能力。

## 1 理论分析

### 1.1 相干探测原理

相干光探测的工作原理框图如图1所示。设同方向到达且同偏振方向的信号光和本振光的电场分别为

$$E_s(t) = A_s \cos(\omega_s t + \varphi_s) \quad (1)$$

$$E_L(t) = A_L \cos(\omega_L t + \varphi_L) \quad (2)$$

式中: $A_s$ 和 $A_L$ 、 $\omega_s$ 和 $\omega_L$ 、 $\varphi_s$ 和 $\varphi_L$ 分别为信号光和本振光的振幅、角频率和相位。设光电探测器的响应度为 $R$ ,由其平方律特性,输出光电流为

基金项目: 装备发展部预研基金资助项目(41413050601)  
通信作者: 董光焰 Email: optgyd@sina.com  
收稿日期: 2018-02-20 修订日期: 2018-04-25

$$I(t) = R [E_s(t) + E_L(t)]^2 \quad (3)$$

式中:横线表示在激光光频周期上的时间平均。将式(3)展开则得

$$I(t) = R \{ A_s^2 \overline{\cos^2(\omega_s t + \varphi_s)} + A_L^2 \overline{\cos^2(\omega_L t + \varphi_L)} + A_s A_L \overline{\cos[(\omega_L + \omega_s)t + (\varphi_L + \varphi_s)]} + A_s A_L \overline{\cos[(\omega_L - \omega_s)t + (\varphi_L - \varphi_s)]} \} \quad (4)$$

式中:第1项和第2项中全余弦函数平方的平均值等于1/2;第3项(余弦因数)的平均值为零,表明和频 $(\omega_L + \omega_s)$ 太高,光混频器对其不响应;第4项为差频项,对于光频来说要缓慢得多。当差频频率 $f_{IF} = (\omega_L - \omega_s)/2\pi$ ,低于光电探测器的截止频率时,那么探测器就有相应的光电流输出。经过分析,用平均光功率表示输出电流为

$$I(t) = R \{ P_s + P_L + 2\sqrt{P_s P_L} \cdot \cos[(\omega_L - \omega_s)t + (\varphi_L - \varphi_s)] \} \quad (5)$$

这个光电流经过有限带宽的中频滤波器将直流成分滤出后得到中频输出电流为

$$I(t) = 2R\sqrt{P_s P_L} \cdot \cos[(\omega_L - \omega_s)t + (\varphi_L - \varphi_s)] \quad (6)$$

当 $\omega_L \neq \omega_s$ 时,称为外差探测,其中频电流如上所示。当 $\omega_L = \omega_s$ 时,称为光零差探测<sup>[8]</sup>,则

$$I(t) = 2R\sqrt{P_s P_L} \cdot \cos(\varphi_L - \varphi_s) \quad (7)$$

由以上可知,相干探测是一种全息探测技术,它既能响应光场的振幅,又能响应光场的角频率、位相等信息。系统对目标多普勒频移的测量正是通过对差频信号的检测而实现的。

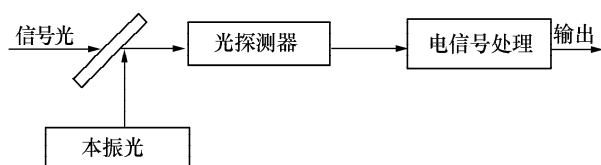


图1 相干光探测工作原理图

## 1.2 灵敏度估算

相干探测体制激光雷达的信噪比方程可表示如下<sup>[9]</sup>

$$SNR = \frac{\eta_D P_s P_{LO}}{h\nu B (P_s + P_{BK} + P_{LO}) + K_1 P_{DK} + K_2 P_{Th}} \quad (8)$$

式中:SNR是激光雷达系统的功能信噪比; $\eta_D$ 是探测器的量子效率; $h$ 是普朗克常量; $\nu$ 是激光频率; $B$ 是电

子带宽; $P_s$ 是接收信号光功率; $P_{BK}$ 是背景光功率; $P_{DK}$ 是探测器暗电流功率; $P$ 是等效热噪声功率; $P_{LO}$ 是本振光的功率; $K_1 = K_2 = hv/2eH_i$ <sup>[10]</sup>, $e$ 为基本电荷, $H_i$ 为响应度。

相干激光雷达中的本振光功率增加时,接收机的散弹噪声随之增加,当本振光功率较大时,使得散弹噪声远大于其他噪声,此时相干激光雷达的信噪比方程可简化为

$$SNR = \frac{\eta_D P_s}{h\nu B} \quad (9)$$

由式(9)可知,在知道电子带宽时,即可估算出一定信噪比下的信号光功率。当 $SNR = 1$ 、 $\eta_D = 0.5$ 时,理论情况下,400 ns激光脉冲的回波信号光功率约 $6.5 \times 10^{-13}$  W。即理论情况下,系统的最小可探测光功率可达 $10^{-13}$  W量级。

为了提高激光雷达系统的信噪比,通常采用多脉冲累积信号处理方式。多脉冲累积技术利用信号的相关性和噪声的不相关特性,可以抑制噪声,提高信噪比。通过多脉冲累积,使得激光雷达的最小可探测光功率有望达到 $10^{-15}$  W~ $10^{-14}$  W量级。

## 1.3 最大探测距离分析

为了摸索激光雷达的探测能力,对激光雷达的最大探测距离指标进行了分析。由于远距离测量时,主要以山体等目标进行测量,消除小目标探测时由于光束引导等因素带来的激光无法有效照射到目标的问题。在对山体等目标测量时,目标尺寸远大于激光的光斑尺寸,因此,遵循大目标散射的激光雷达方程为

$$R = \left[ \frac{P T_A^2 \rho D^2 \eta_t \eta_r}{4 P_r} \right] \quad (10)$$

式中: $R$ 为探测距离; $P$ 为激光发射峰值功率,取值为50 W; $\eta_t$ 为发射光学效率,取0.8; $\eta_r$ 为接收光学效率,取0.6; $\rho$ 为目标的激光反射率,取0.25; $D$ 为接收光学天线直径,取45 mm; $T_A^2$ 为大气双程透过率;以LOWTRAN软件中的中纬度夏季,海拔3 000 m,大气能见度100 km为条件,大气的单程透过率0.56; $P_r$ 为接收到的信号光功率,在400次脉冲累积,信噪比取6时,光功率为 $2 \times 10^{-13}$  W。将上述各参量代入式(10)后可知,系统的最大可探测距离约105 km,因此,经估算,激光雷达的最远探测距离约100 km。

## 2 系统构成

远程激光雷达以国产化单频激光器为基础,采用全光纤化的系统设计方案,实现远距离目标的有效测量。该雷达由三部分组成:激光雷达主机、电源箱及显控计算机。系统采用模块化设计,使得结构十分紧凑、

稳定性好。雷达主机尺寸为 400 mm×400 mm×250 mm。在系统设计方案中为了提高系统的抗干扰能力,结构上采用了分腔设计,将弱强电进行分离,弱电和强电分别处于不同的腔内并采取屏蔽措施。远程激光雷达系统的构成原理如图 2 所示。

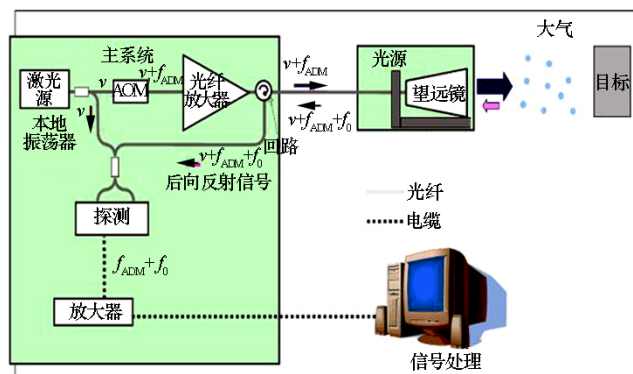


图 2 远程激光雷达系统原理框图

系统中激光发射机采用了 1.55 μm 波段的光纤器件,包括单频种子源、声光调制器及脉冲放大器,其中,单频激光种子源功率为 20 mW;声光调制(AOM)采用高消光比光纤调制器,将连续激光进行脉冲调制;脉冲放大采用 MOPA 的技术方案,实现峰值功率达 50 W 的激光输出;光学天线采用收发合置的设计方案,利用保偏光纤环形器,实现发射激光和回波激光的收发分离;采用二维扫描振镜实现不同方向的光束偏转,回波光信号通过 2×2 光纤合束器与本振光进行耦合,并利用光纤耦合的平衡探测器进行混频信号的光电转换;信息采集处理系统(500 MHz 采样率)经过数据的采集、滤波和处理,完成目标信号的提取和结果计算。远程激光雷达实物样机及系统参数情况见图 3 和表 1。



图 3 远程激光雷达系统样机

表 1 远程激光雷达系统参数

系统参数	技术指标
激光波长/nm	1 550
峰值功率/W	50
脉冲宽度/ns	400
重复频率/kHz	10(可调)
接收带宽/MHz	200
接收方式	平衡探测
采样频率/MHz	500
采样位数/位	12
天线尺寸/mm	45

### 3 测试试验

#### 3.1 灵敏度测试比对

为了分析和验证远程激光雷达的探测灵敏度,将远程激光雷达与火控激光测距机进行了测试比对。在同一时间、同一地点、对同一目标进行同时测量,通过衰减发射光功率,并通过示波器观察信号信噪比情况。在相同信噪比情况下,比较远程激光雷达的最小发射功率与火控激光测距机发射功率的差异,并结合光学天线尺寸、大气衰减特性等,比对两套系统的探测灵敏度。测试比对的试验原理如图 4 所示。

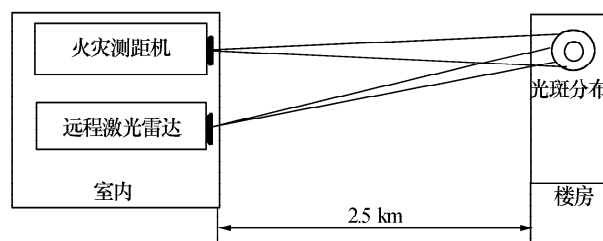


图 4 测试比对示意图

由于远程激光雷达与火控测距机测量同一楼房目标,目标尺寸远大于光斑尺寸,遵循大目标探测方程(与发散角无关)。此外,由于激光波长相差不大(波长分别为 1.06 μm 和 1.55 μm),因此可认为目标反射率相当。

根据激光雷达方程可知,比较的参量主要包括激光峰值功率、大气双程透过率、接收口径及探测灵敏度等指标。远程测距激光雷达与火控激光测距机的技术参数如表 2 所示。

表 2 系统技术参数

参量	火控测距机	远程激光雷达
工作波长/μm	1.00	1.55
峰值功率/W	32.33×10 <sup>6</sup>	50
衰减量/dB	32.84	15.20
天线口径/mm	120	45

实际测量时(能见度约 10 km),根据 LOWTRAN 软件中纬度夏季的参数模型,2.5 km 目标探测时 1.55 μm 和 1.06 μm 两个波长的大气单程透过率分别为 0.771 和 0.659,可认为大气透过率相当。在大气透过率、目标反射率、光学系统效率、探测距离等参数均相当条件下,根据大目标激光雷达方程

$$R = \left[ \frac{PT_{\Delta}^2 D^2 \eta_t \eta_r}{4P_r} \right]^{1/2} \quad (11)$$

可知,两套系统接收光功率的比值主要由发射光功率和光学天线尺寸决定,从而有

$$\frac{P_{r\text{远程}}}{P_{r\text{测距机}}} = \frac{P_{\text{远程雷达}} D_{\text{远程雷达}}^2 A_{\text{火控测距机}}}{P_{\text{火控测距机}} D_{\text{火控测距机}}^2 A_{\text{远程雷达}}} \quad (12)$$

式中: $A$  为光功率的衰减倍数。将系统参数代入式

(12) 可得

$$\frac{P_{\text{远程}}}{P_{\text{测距机}}} = 1.25 \times 10^{-5} \quad (13)$$

式(13)表明,在相同信噪比下,远程测距激光雷达的接收光功率是火控激光测距机的  $10^{-5}$  倍。

常规激光测距机探测灵敏度可达  $10^{-9}$  W 量级,因此可推算远程激光雷达灵敏度约  $1.25 \times 10^{-4}$  W。由于远程激光雷达采用了 400 次脉冲累积,因此推断单次激光灵敏度约  $2.5 \times 10^{-13}$  W,与理论分析的探测灵敏度  $10^{-13}$  W 量级非常吻合。

### 3.2 外场试验

为了验证远程激光雷达的最远探测能力,项目组赴青海湖进行了外场测距试验。试验场地选择在刚察县青海湖西北侧附近一个孤立山丘上,海拔 3 300 m,能够俯瞰整个青海湖环境。试验测量场所及目标分布情况如图 5 所示。



图 5 试验测试场景及青海湖周围测量目标分布情况

经过半个月测量,远程激光雷达实现了不同目标的测距试验,并经过测试,最远测量距离达 85.59 km,充分验证了激光雷达具有远距离目标测距能力。部分外场试验的测试结果如表 3 所示。

表 3 青海湖外场试验测试数据情况

序号	测量目标	大气能见度	测量结果	备注
1	高压电线塔		30.20	
2	鸟岛		32.25	
3	海心山		50.10	
4	山体 1	100	52.95	
5	山体 2		70.05	
6	山体 3		74.76	
7	山体 4		84.36	
8	山体 5		85.59	

### 3.3 试验结果分析

(1) 通过灵敏度比对测试试验验证了远程激光雷达探测灵敏度已达  $10^{-13}$  W 量级,与理论分析吻合。

(2) 通过低功率、小口径天线下 85.59 km 距离目标测量结果可知,远程激光雷达的最远探测能力与理论分析基本吻合。

(3) 通过增加激光功率,加大光学天线尺寸等条件,远程激光雷达具备百公里量级目标探测能力。

## 4 结束语

相干探测体制的激光雷达是未来远程探测设备的一个重要发展方向。针对远程光电探测的应用需求,在国产化单频激光发射机研制的基础上,设计了一款小型化全光纤激光雷达,并进行了激光雷达与火控激光测距机的探测灵敏度比对和高海拔远距离目标探测外场试验,实现了 20  $\mu$ J 脉冲能量下 85.59 km 目标的测试,验证了相干探测体制激光雷达的技术能力。后续将通过高能量激光发射机、大口径光学天线等部件的设计,开展更远距离的目标探测试验。

### 参考文献

- [1] 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, 43(5): 1-8.  
LUO Yuan, HE Yan, GENG Liming, et al. Long-distance laser ranging lidar based on photon counting technology [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(5): 1-8.
- [2] ASAKA K, YABAGUSAWA T, HIRANO Y. 1.5  $\mu$ m eye-safe coherent lidar system for wind velocity measurement [C]// [S.l.]: SPIE Press, 2001, 4153: 321-328.
- [3] TUCKER S C, BREWER W A, HARDESTY R M. Ship-based high resolution Doppler lidar (HRDL) measurements of boundary layer winds and relative aerosol backscatter during the 2006 texas air quality study [C]// 14th Coherent Laser Radar Conference. Snowmass Village, CO: CIRES, 2006.
- [4] WANG Jinxue. Doppler wind lidar technology development and demonstration [J]. Proceedings of the AIAA, 2005, 6772: 1-11.
- [5] FUJII T, FUKUCHI T. Laser remote sensing [M]. Boca Ration, Florida: CRC Press, 2005.
- [6] HUFFAKER R M, HARDESTY R M. Remote sensing of atmospheric wind velocities using solid-state and CO<sub>2</sub> coherent laser system [J]. Proceeding of the IEEE, 1996, 84(2): 181-204.
- [7] 付有余. 相干激光雷达的进展 [J]. 光机电信息, 2010, 27(10): 16-21.  
FU Youyu. Development of coherent laser radar [J]. OME Information, 2010, 27(10): 16-21.
- [8] 蒋红艳,何宁. 基于声光效应的相干光探测方法的研究 [J]. 光电子技术, 2009, 29(3): 164-167.  
JIANG Hongyan, HE Ning. Research on the coherent optical detection technology based on acousto optic effect [J]. Optoelectronic Technology, 2009, 29(3): 164-167.
- [9] HAWLEY J G, TARG R, HENDERSON S W. Coherent launch-site atmospheric wind sounder: theory and experiment [J]. Applied Optics, 1993, 32(24): 4557-4568.
- [10] JELALION A V. Laser radar systems [M]. [S.l.]: Artech House Radar Library, 1992.

董光焰 男,1978 年生,硕士,高级工程师。研究方向为激光探测。