

主被动结合激光雷达系统设计与性能仿真

王磊¹, 赵海宾², 余继周¹, 胡庆荣¹, 鲁耀兵¹, 张圆成¹

- (1. 中国航天科工集团二院二十三所, 北京 100854;
2. 中国人民解放军驻航天二院二十三所军代表室, 北京 100854)

摘要: 为了验证远程激光雷达系统的关键技术, 提出了一种基于 Nd:YAG 固体激光器的激光雷达试验系统。试验系统由光学收发子系统、控制子系统、信号处理子系统组成, 利用电荷耦合器件进行引导, 采用双探测器型粗、精双轴跟踪结构实现对目标的精密跟踪, 采用数字域的信号处理方法提升系统的探测精度。最后分析了系统对不同反射截面目标的探测距离, 分析结果表明, 在 1 级大气条件下, 系统对 1 m² 目标的探测距离达到 22 km。

关键词: 激光雷达; 双轴跟踪; 信噪比; 压电陶瓷

中图分类号: TN247; TN209 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)S-0068-05

Passive and active combined LADAR system design and simulation

Wang Lei¹, Zhao Haibin², Yu Jizhou¹, Hu Qingrong¹, Lu Yaobing¹, Zhang Yuancheng¹

- (1. No.23 Institute of the Second Academy, CASIC, Beijing 100854, China;
2. PLA Representative office in No.23 Institute of the Second Academy, Beijing 100854, China)

Abstract: In order to test the key technologies of long-range LADAR, the experimental system was proposed based on the Nd:YAG laser. The system was combined with optical sub-system, control sub-system and signal process sub-system, and directed by charge-coupled device (CCD) when working. Coarse and fine dual-axis structure was adopted to realize the precise tracking of the target. Meanwhile, in order to increase the detection precision, the laser signal was processed in digital domain. At last, the detection range of the system was analyzed versus different laser cross section targets (LCS). The result shows that if the LCS is 1 m² and the atmosphere is first order, the detection range of the system is 22 km.

Key words: LADAR; dual axis tracking; signal to noise ratio; PZT

0 引言

激光雷达技术是一项正在迅速发展的高新技术,以其极高的时域、空域、频域分辨率和抗干扰能力在目标探测/跟踪/识别、火力控制、精确制导、飞行器测控等军事领域得到了广泛应用^[1-4],还广泛应用于地形测绘、大气探测、测风等民用领域,更有望成为智能机器人、3D 打印、无人驾驶平台、虚拟现实等领域的幕后推手^[5-6]。因此受到了各国的极大关注,并把激光雷达作为限制扩散的军事技术之一。

美国于 20 世纪 70 年代初开始研制“火池”激光雷达,并于 1976 年完成精密跟踪试验,跟踪距离达到 1 000 km,跟踪精度达到 $1 \mu\text{rad}$ ^[7]。20 世纪 90 年代初,美国空军和海军先后实施了旨在发展空基红外预警探测系统的计划。1998 年投入使用的“眼镜球蛇”预警机上装备的激光测距机,对导弹的测距能力为 400 km,而装备多种预警机的“门警”红外/激光雷达系统,测距范围为 100~1 000 km,测距精度约 1 m ^[7]。国内在近距离激光探测系统研制方面成果显著,设备在测距和目标指示等领域得到了广泛应用^[8];在末制导领域,随着导引头功能的丰富,激光探测已得到重点关注^[9]。

虽然国内激光探测技术的发展成绩斐然,但是在远程激光探测领域,发展缓慢,与国外的差距是全方位的。文中在分析国内外激光雷达技术发展的基础上,借鉴国外先进系统的设计经验,并结合微波雷达系统设计经验,提出了一种基于多轴控制的主被动结合激光雷达样机系统,并对其性能进行了估计,为填补我国在远程激光探测领域的能力不足奠定一定的技术基础。

1 系统设计

激光雷达是集光、机、电、控制为一体的复杂系统,其系统概念图如图 1 所示。系统的工作过程如下:首先利用可见光 CCD 对空域进行大范围的搜索,发现目标后,对目标进行稳定跟踪,然后向目标发射激光脉冲,目标反射回光信号经光电探测器接收后转化为电信号;光电信号经过信号子系统处理后,最终获得目标的距离、角度等信息。系统主要包括:(1) 光学收发子系统;(2) 控制子系统;(3) 信

号处理子系统。

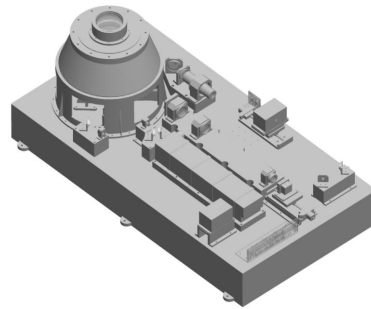


图 1 激光雷达系统概念图

Fig.1 Diagram of the LADAR system

1.1 光学收发子系统

光学收发子系统主要实现以下功能:(1) 将可见光会聚到 CCD 的靶面上;(2) 将激光脉冲进行扩束并辐射到自由空间;(3) 将目标反射光信号会聚到光电探测器靶面。光学收发子系统的性能直接决定了主被动结合激光雷达系统的性能,在设计过程中需要重点考虑以下五个问题:(1) 可见光 CCD 和光电探测器灵敏度;(2) 激光与可见光的复合;(3) 光学接收口径;(4) 探测器的焦距和离焦;(5) 光机系统的结构设计如何优化雷达系统的跟踪控制。

文中根据主被动结合激光雷达系统的功能要求设计了一种可见光、激光收发共光路的光机系统,主要由望远镜、激光发射光路、可见光/激光复合接收光路和电动位移平台等组成。其中望远镜作为光学收发子系统的核心部件,在发射光路中用来压缩高能激光束散角,在接收光路中用来收集足够多的信号光能量,使得光电探测器能够探测到信号光,以完成高精度的测距和定位。因此,选择合适的结构形式对望远镜的设计是至关重要的。当前望远镜主要有两种结构形式:反射式和透射式。相较于透射式望远镜结构,反射式结构光路复杂且面型的加工精度和加工成本较高,而且在小口径光学系统中,受制于遮拦比,光学收发效率低,所以文中系统的望远镜采用透射式结构。其优点:(1) 结构简单,轴向尺寸可以减小整个装置的几何尺寸,并且目镜可以对物镜进行像差校正;(2) 满口径接收光信号,提高了镜头的利用率;(3) 便于加工和装调。

一方面考虑到系统采用大于 $1 \text{ k} \times 1 \text{ k}$ 的可见光 CCD 进行引导,另一方面考虑到激光与探测器探测

窗口匹配问题,光学收发子系统采用结构紧凑的 1 064 nm Nd:YAG 固体激光器作为主动照明光源,单脉冲能量 250 mJ,脉冲宽度 10 ns,光束发散角为 0.5 mrad,而用于探测激光的光电探测器采用 Si 基四象限雪崩光电探测器。为了解决可见光 CCD 探测器获取图像的离焦问题和激光跟踪精度问题,系统利用激光探测获取的距离信息实时调整 CCD 探测器和四象限探测器的焦距,一方面保证系统可以获得清晰的目标图像,另一方面保证系统的探测精度。

1.2 控制子系统

控制子系统是主被动复合探测系统实现对目标高精度探测的核心,在控制子系统的设计过程中面临的主要问题是:如何发挥激光主动探测的优势,从而提升系统的探测能力。

文中在分析基于被动传感器的高精度探测系统的基础上,综合考虑主被动复合探测系统的工作特点,设计了一种基于主被动探测的粗、精双轴跟踪结构。该控制结构不仅可以实现对特定视场内目标的稳定跟踪,而且可以将激光束锁定在目标的特定位置上。

系统的粗瞄机构由潜望式转台(如图 2 所示)和可见光 CCD 探测器构成,其中潜望式转台采用直流力矩电机进行驱动,同时采用角度分辨率优于 1"的码盘进行测角,以实现大视场的搜索和目标的捕获、跟踪。系统的精瞄机构由基于压电陶瓷的位置控制器和四象限光电探测器构成,其主要特点为控制精度高、带宽宽、结构紧凑、体积小、无机械摩擦、无间隙,而且采用了柔性铰链杠杆结构,实现了微小位移控制,其开环角分辨率可以达到 0.1 μrad ,闭环角分辨率优于 1 μrad 。系统所设计的粗、精双轴跟踪结构不仅实现了大视场范围的搜索,而且实现了对特定目标的高精度跟踪。

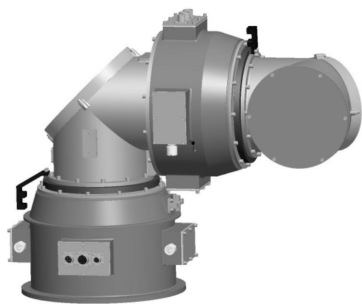


图 2 潜望式转台示意图

Fig.2 Diagram of the periscope servo

1.3 信号处理子系统

信号处理子系统作为主被动复合探测系统的中枢系统,除了完成探测器输出信号的处理,获取目标的距离、角度等信息,还是信号检测、测距算法、测角算法、误差提取等功能的实现平台。因此系统的信号处理子系统对数据的采集能力、传输能力、处理能力和存储能力都提出了较高的要求。

文中通过分析微波雷达系统的信号处理架构,提出了一种基于 TS201S 架构的 cPCI 接口标准的信号处理架构,并进行模块化设计。信号处理子系统采用高采样密度的信号采集单元,该采集单元具有 500 M A/D 采集能力,并且采用主频高达 600 MHz 的 ADSP-TS201S,每片提供 3.6 GFLOPS 的峰值运算能力;采用集成了 AD 公司的 8 个 600 MHz TS201S 处理器的信号处理单元,提供 28.8 GFLOPS 峰值计算能力;采用了 768 G 字节的存储空间和大于 300 MBps 的持续数据写入速率的全固态大容量存储单元,并提供多种高速读写 IO 接口;采用独立的时序控制单元,产生整个系统的时序控制信号,可以接收高达 200 MHz 的正弦波输入。

1.4 系统设计指标

激光雷达试验系统设计的主要指标见表 1。

表 1 激光雷达系统设想指标

Tab.1 Parameters of the vision system

Item	Parameter	Item	Parameter
Laser frequency	100 Hz	Divergence	0.1 mrad
Pulse energy	250 mJ	Lens diameter	150 mm
Pulse width	10 ns	Efficiency	0.25
SNR	13 dB	LCS ¹⁾	1 m ² , 5 m ² , 10 m ²
Gain	50	BW	75 MHz

注:1) Laser Cross Section。

2 系统成像能力分析与仿真

激光雷达系统的探测距离主要取决于系统的探测信噪比。激光雷达工作过程中噪声复杂,包括背景光噪声、热噪声、散粒噪声等,通过分析信号光能能量

和噪声能量,推导出估计系统探测能力的近似公式。

2.1 信号光

文中针对点目标进行分析,激光经目标反射后被望远镜接收的光信号 P_R 经过光电探测器转化为电流信号,其大小分别为:

$$P_R = P_T G_T \times \frac{\sigma}{4\pi R^2} \times \frac{\pi D^2/4}{4\pi R^2} \times \eta_{\text{atm}} \times \eta_{\text{sys}} \quad (1)$$

$$i_s = P_R \times \eta \cdot \frac{e \cdot \lambda}{h \cdot c} \quad (2)$$

式中: P_T 为发射激光脉冲峰值功率, W; G_T 为光学天线增益; σ 为目标散射截面, m^2 ; R 为目标距离, m; D 为光学系统有效接收口径, m^2 ; η_{atm} 为大气传输系数; η_{sys} 为激光雷达光学系统总效率; η 为探测器量子效率; e 为电子电量, 1.6×10^{-19} C; h 为普朗克常量, 6.63×10^{-34} J·s; λ 为激光波长; c 为空气中光速。

2.2 噪声^[10]

激光雷达系统工作过程中噪声来源复杂,包括背景光噪声、热噪声、散粒噪声等。

2.2.1 背景光噪声

背景光噪声源主要由太阳辐射引起,其噪声功率与太阳光辐射度、接收系统视场、通光面积、窄带滤光片带宽等因素有关,可以表示为:

$$P_{\text{BK}} = K_1 S_\lambda \Delta \lambda \Omega_R I_s \eta_{\text{sys}} A_R \quad (3)$$

式中: K_1 为太阳光通过大气的透过系数; S_λ 为太阳光谱辐射谱密度; $\Delta \lambda$ 为接收光波长范围; Ω_R 为接收系统立体角; I_s 为大气散射系数; η_{sys} 为接收系统透过率; A_R 为有效接收面积。

背景光噪声电流为:

$$i_b = P_{\text{BK}} \times \eta \cdot \frac{e \cdot \lambda}{h \cdot c} \cdot M \quad (4)$$

式中: M 为探测器内增益。

2.2.2 热噪声

热噪声主要来源于探测器的热噪声,探测器热噪声的主要来源是光电管的负载电阻,只要在绝对温度之上,任何电阻内的电子都永远不会是静止不动的。即使没有外加电压,也会由于自身的热能而不停地运动,所以电阻中存在随机变化的电流,其均方值为:

$$\langle i_{\text{th}}^2 \rangle = \frac{4k_B T_0 B}{R_L} \quad (5)$$

式中: k_B 为玻尔兹曼常数, 1.38×10^{-23} J/K; T_0 为绝对热力学温度; B 为响应带宽; R_L 为负载电阻。

2.2.3 散粒噪声

散粒噪声是由光子产生和复合的统计特性引发,其统计规律服从泊松过程,该噪声分为两个部分,一部分为探测器的暗电流散粒噪声,另一部分为光子噪声。考虑到暗电流、背景光和信号光的共同作用,散粒噪声的均方值为:

$$\langle i_{\text{sh}}^2 \rangle = 2e i_{\text{ds}} B + 2e (i_{\text{th}} + i_b + i_s) M^2 F B \quad (6)$$

式中: i_{ds} 为探测器表面暗电流; i_{th} 为探测器体暗电流; i_b 为背景光产生光电流; $F = M^x$ 为附加噪声因子,表示雪崩过程中的噪声贡献; x 为材料的噪声指数。

2.3 信噪比

综上所述,光电探测器将光信号转化为电信号的输出功率信噪比可表示为:

$$\left(\frac{S}{N} \right)_P = \frac{(i_s M)^2}{\left[2e i_{\text{ds}} B + 2e (i_{\text{th}} + i_b + i_s) M^2 F B + (i_b M)^2 + \frac{4k_B T_0 B}{R_L} \right]} \quad (7)$$

将表 1 的相关数据带入公式(7)计算出激光试验样机系统对不同目标的探测距离见表 2。

表 2 激光雷达探测距离估计

Tab.2 Range of the LADAR system

Atmosphere level	1 m ²	5 m ²	10 m ²
1st level	22.2 km	28.7 km	31.8 km
2nd level	20.4 km	25.9 km	28.6 km
3rd level	14.1 km	17.1 km	18.5 km
4th level	7.7 km	8.9 km	9.5 km

3 总结

文中根据激光雷达技术发展的需求,提出了一种基于粗、精双轴控制的主被动结合激光雷达系统。该系统不仅可以验证激光雷达的若干关键技术,而且具有如下特点:(1) 在系统的信号处理方面引入了微波雷达模块化设计思想;(2) 在系统的控制方面引入了基于被动探测器的多轴控制思想,设计了一种主被动多轴控制结构;(3) 在系统的光学设计方面,采用了可见光和激光的共光路体制,为系统减小体积和重量并优化结构奠定基础。文中的内容可作为未来激光雷达系统的设计和研发的重要参考。

参考文献:

- [1] Jiang Xingshan, Chen Jianxin. Laser radar and its applications [J]. *Journal of Jiamusi University(Natural Science Edition)*, 2000, 18(1): 93-95. (in Chinese)
姜兴山, 陈建新. 激光雷达及其应用 [J]. 佳木斯大学学报(自然科学版), 2000, 18(1): 93-95.
- [2] Ni Shuxin, Li Yifei. Trend of laser radar for military [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2003, 32(2): 137-142. (in Chinese)
倪树新, 李一飞. 军用激光雷达的发展趋势 [J]. 红外与激光工程, 2003, 32(2): 137-142.
- [3] Xu Chunxiao, Zhou Feng. Development and applications of space-borne laser remote sensing technology [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2009, 30(4): 26-31. (in Chinese)
许春晓, 周峰. 星载激光遥感技术的发展及应用 [J]. 航天返回与遥感, 2009, 30(4): 26-31.
- [4] Li Qi, Wang Dong, Yao Rui, et al. Multi-mode ladar/radar detection research status[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(S): 100-103. (in Chinese)
李琦, 王东, 姚睿, 等. 激光雷达/雷达多模复合探测的研究近况[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(S): 100-103.
- [5] Wang Qingmei, Zhang Yimo. Development of Meteorological Lidar [J]. *Meteorological Science and Technology*, 2006, 34(3): 246-249. (in Chinese)
王青梅, 张以谟. 气象激光雷达的发展现状[J]. 气象科技, 2006, 34(3): 246-249.
- [6] Liu Bo, Chen Nianjiang, Zhang Zhongping, et al. Technology of micro-pulse satellite laser ranging[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(S): 234-237. (in Chinese)
刘波, 陈念江, 张忠萍, 等. 微脉冲激光人卫测距技术[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(S): 234-237.
- [7] Ni Shuxin. Development and application of the long-range laserradar [C]//Five Provinces and One City Joint Annual Meeting, 13 Provinces and Cities Joint Proceedings, 2008: 271-274. (in Chinese)
倪树新. 远程激光雷达的发展和应[C]//五省一市光学联合年会、十三省市光学联合年会论文集, 2008: 271-274.
- [8] Wang Xiufang. The research of pulsed semiconductor Laser rangefinder [D]. Chengdu: Sichuan University, 2006: 1-56. (in Chinese)
王秀芳. 脉冲半导体激光测距的研究 [D]. 成都: 四川大学, 2006: 1-56.
- [9] Liu Zhiguo, Wang Shicheng, Zhang Jinsheng, et al. The research of laser seeker for terminal guidance of ballistic missile [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2005, 25(1): 302-305. (in Chinese)
刘志国, 王仕成, 张金生, 等. 激光导引头在弹道导弹末制导中的应用研究[J]. 弹箭与制导学报, 2005, 25(1): 302-305.
- [10] Webb P P, McIntyre R J, Conradi J. Properties of avalanche photodiodes[J]. *RCA Review*, 1974, 35: 234-277.