

光波导相控阵激光雷达接收系统设计

林亚俊 韩香娥

西安电子科技大学物理与光电工程学院, 陕西 西安 710071

摘要 光学相控阵光束扫描方法不同于传统的平面镜等机械扫描手段,能够高速地完成无惯性自由寻址。AlGaAs 光波导相控阵激光雷达具有扫描速度快、扫描角度大等优点,其大扫描角度和极快的扫描速度给接收系统的设计带来了困难。基于 AlGaAs 光波导相控阵扫描器件,设计了直接探测与外差探测两种接收系统并分析了其信噪比特性。在直接探测方案中,为减少背景噪声,采用多口径阵列接收光学系统,针对其弱回波信号选用雪崩光电二极管(APD)光电探测器;在外差探测方案中,针对其大扫描角度,采用艾里斑方法增大相干失配角,实现大角度相干探测。最后对两种方案的优缺点进行了比较。

关键词 激光光学;激光雷达;光学相控阵;外差探测

中图分类号 TN95 **文献标识码** A

doi: 10.3788/CJL201542.s116001

Design of Receiving System for Waveguide Optical Phased Array Lidar

Lin Yajun Han Xiang'e

School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China

Abstract Optical phase array scanning method is different from traditional mechanical scanning method as well as flat mirror, which can achieve inertialess random-access. AlGaAs waveguide optical phased array lidar has highlighted advantages in scanning speed, sweep range, etc. But the advantages bring difficulties in designing receiving system. Based on the AlGaAs waveguide phased array scanning lidar system, we design a direct detection and a heterodyne detection of the receiving system and analyze their characteristics of signal noise ratio. In the direct detection solution, in order to reduce background noise, multi aperture array receiving optical system is used. Aiming at the weak echo signal, we choose avalanche photo diode (APD) photoelectric detectors. In the heterodyne detection solution, for its large scan angle, we use the Airy method to achieve big angle coherent detection. Finally, the advantages and disadvantages of the two solutions are compared.

Key words laser optics; lidar; optical phased array; heterodyne detection

OCIS codes 220.4830; 230.7370; 250.0040; 280.5600

1 引言

AlGaAs 光波导光学相控阵阵列具有扫描速度快,角度宽且器件体积微小,驱动电压低,功耗小等优点,该器件还可以克服液晶光学相控阵边缘电场对发射光束的影响,是具有发展潜力的光学相控阵器件。西安电子科技大学研制的 AlGaAs 光波导相控阵电光扫描系统已实现 1MHz 的高速扫描和一维 $\pm 10^\circ$ 的扫描范围。基于该扫描系统的激光雷达接收系统设计具有很大挑战性,它对接收系统的光电接收灵敏度、响应速度、信号接收速度及有效克服噪声均提出较高要求。^[1-3]

本文介绍了光波导相控阵光束扫描原理,在此基础上,分析了接收系统接收到的回波功率、背景噪声和探测器噪声,设计了直接探测与外差探测两种接收系统并分析了其信噪比(SNR)特性。

收稿日期: 2015-02-15 **收到修改稿日期:** 2015-03-05

作者简介: 林亚俊(1990—),男,硕士研究生,主要从事激光控制方面的研究。E-mail: linyajun0902@126.com

导师简介: 韩香娥(1962—),女,博士,教授,主要从事电磁波传输与散射方面的研究。

E-mail: xehan@mail.xidian.edu.cn

2 光波导相控阵激光雷达接收系统要求

波束指向控制是激光雷达进行激光扫描的基础,是完成探测的重要部分,一般的波束扫描的实现方式通常是机械控制,目前的激光雷达多采取这种方式。对机械扫描结构来说,扫描速度受到限制,也无法实现空间随机指向扫描,而目前深受重视的液晶相控阵扫描在扫描速度上还不能令人满意。涉及的 AlGaAs 光波导相控阵波束扫描^[4-5]。由于普通单个大视场光学接收系统同时接收很强的背景光,严重影响回波信号的探测鉴别,探测器回波探测甚至可能导致探测饱和。因此采用多口径阵列接收光学探测方法对回波信号进行接收,即由多个小视场子光学系统实现大视场接收光学系统。^[6-12]

2.1 回波功率分析

AlGaAs 光波导相控阵激光雷达参数如下:激光器输出功率 5 W,出射激光束发散角: $\theta=14$ mrad,发射光学系统透射率: $\tau_t=1$,探测距离 $R_m=50$ m,大气吸收影响可忽略,大气透射率: $\tau_a=1$,垂直入射 $\alpha=0^\circ$,目标反射率 $\rho=1$,光学孔径 50 mm,光学接收入瞳面积 $S_e=19.63$ cm²,单个子接收系统视场角: $\theta_r=1^\circ$,接收光学系统透射率: $\tau_r=0.9$,波导透射率:50%。

若目标尺寸大于照射光束光斑直径,为扩展目标,根据单站激光雷达方程,回波功率^[1]为

$$P_r = \frac{\tau_t \tau_r \tau_a^2 \rho P_t S_e}{\pi R_m^2}, \quad (1)$$

把上述参数代入(1)式可得探测距离 50 m 时,激光回波功率大小为 0.6 μ m。

2.2 探测器噪声与背景噪声分析

2.2.1 探测器噪声分析

实验所采用的 Laser Components 公司出品的 sar1500xSi-APD 雪崩光电二极管组件的具体特性如下:内增益 $M=100$,响应度 $R=50$ A/W,暗电流 $I_d=3$ nA,闪烁系数 $K_1=1$,电荷量 $e=1.6 \times 10^{-19}$ C,玻尔兹曼常数 $k=1.38 \times 10^{-23}$ J/K,内阻 $R_L=10$ k Ω ,温度 $T=290$ K,信号功率 $P=6.0 \times 10^{-7}$ W,光辐射的调制频率 $f=1$ MHz,带宽 $\Delta f=10$ MHz。

参考文献[7-8]给出了光电探测器的主要噪声(散粒噪声、产生-复合噪声、热噪声以及 $1/f$ 噪声)的计算方法,结合 sar1500x Si-APD 的具体参数计算其噪声大小,计算得到其总噪声电压为 0.025 V。由探测器响应度和信号功率可得信号电压为 0.33 V,可见所选用的探测器的噪声很小,对信噪比产生的影响不大。

2.2.2 背景噪声分析

对于地基光电探测系统来说,评估其性能时背景光噪声主要考虑白天目标反射太阳光和天空背景辐射。对于大目标,激光雷达接收到的总背景噪声光功率为

$$P_{BK} = P_{Bsun} + P_{Bsky} = 0.25 \theta_r^2 \tau_r \Delta \lambda S_e (\sigma_a E_{sun} \cos \theta_i \cos \alpha + \pi L_{sky}). \quad (2)$$

设阳光与目标表面法向夹角 θ_i 为 45° ,窄带干涉滤光片带宽 $\Delta \lambda=10$ nm,利用 Modtran 软件计算了天顶角为 0° ,距地面不同高度时天空辐射亮度的光谱分布和太阳光谱照度,计算条件:北纬 30° 、东经 120° ,6月30日(夏季),乡村气溶胶模型,能见度 23 km,无云无雨,观察时间北京时间 14:00。得到地面处太阳光谱在 0.98 μ m 的照度为 $E_{sun}=400$ W/(m²· μ m),天空亮度辐射光谱在 0.98 μ m 处的亮度为 $L_{sky}=6.23$ W/(μ m·str·m²)。

把 2.1 节参数代入(2)式,由于采用多口径系统,单个探测器的视场角 θ_r 由 4° 变为 1° ,由(2)式计算得,背景噪声由 6.4 μ W 变为 0.4 μ W,大大减小了探测器接收到的背景噪声,使背景噪声功率小于回波信号功率 0.6 μ W,因此,接收系统能够接收鉴别回波信号。

2.3 光学接收系统设计

根据本激光雷达系统总体结构要求,接收光学系统的视场角 $2\omega=1^\circ$,光学孔径为 $D=50$ mm,采取透射式接收光学系统,采取简单的球面镜与双胶合透镜的组合来满足大孔径、小像差等要求。接收光学系统视场角设计为 4° ,即需要 4 个子光学系统的组合。

3 外差探测接收系统设计

在直接探测中,探测器不能区别信号光与背景光,而回波信号的功率非常微弱,强背景噪声极大地限制了直接探测接收系统的信噪比和探测距离,且阵列探测的方式使系统体积过大,成本高昂。因此,同时设计

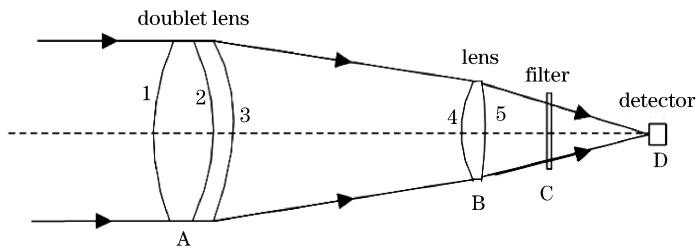


图 1 子光学系统光路设计

Fig. 1 Design of light path of the subsystem

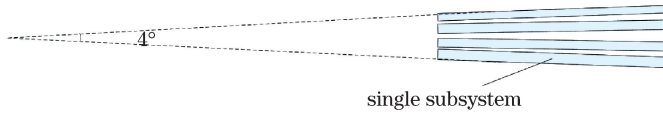


图 2 接收系统俯视示意图

Fig. 2 Top view of the receiving system

了基于相干探测的接收方案。

光频外差探测是基于两束光在光电探测器光敏面上的相干效应,对光波所携带的信息进行探测,探测原理如图 3 所示。

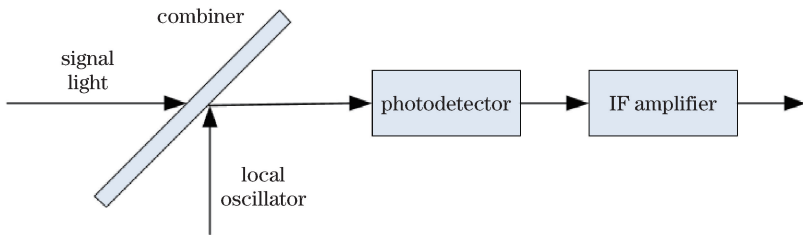


图 3 光外差探测原理

Fig. 3 Optical heterodyne detection principle

由于光辐射的波长比光混频器的尺寸小得多,实际上光混频是在一个个小面积元上发生的,即总的中频电流等于光混频器表面上每一微分面积元所产生的微分中频电流之和。很显然,只有当这些微分中频电流保持恒定的相位关系时,总的中频电流才会达到最大。这就要求信号光和本振光的波前必须重合,也就是说,必须保持信号光和本振光在空间上角准直。

由于接收光学系统视场角设计参数为 4° ,信号光和本振光不能满足准直条件,因此需要增大信号光和本振光之间允许的最大不匹配夹角。因此,接收时采用艾里斑方法,即在合束器后放置一聚焦透镜,使信号光在探测器表面聚焦为一艾里斑,由参考文献[3]可知,此时信号光和本振光之间允许的最大不匹配夹角 θ_{\max} 为

$$\theta_{\max} = \frac{\lambda_L}{d}, \quad (3)$$

式中, λ_L 为本振光波长, d 为艾里斑的直径。取 $d=10 \mu\text{m}$, $\lambda_L=1.06 \mu\text{m}$, 得到 $\theta_{\max}=6.1^\circ$, 即本振光与信号光的夹角必须小于 6.1° 。由于接收系统视场角为 4° , 所以该条件实验中能够满足, 可见使用艾里斑原理方法增大视场角是可行的。

由于相比本振光斑面积, 信号光斑面积非常小, 为了防止本振光引入过多噪声并同时保证信号光与本振光能够重叠相干, 在本振光光路中加入一矩形光阑。外差探测具体方案如图 4 所示。

如图 4 所示, 采用 1064 nm 窄线宽激光器为激光源, 发出谱宽很窄的连续激光, 经过分束器后, 大部分激光经过声光调制后成为脉冲光, 声光调制器进行脉冲调制的同时能够对入射光进行移频, 出射光耦合入光波导阵列发射扫描; 小部分激光作为本振光, 经衰减后, 通过矩形光阑和合束器与接收的信号光一同照射到探测器表面相干。

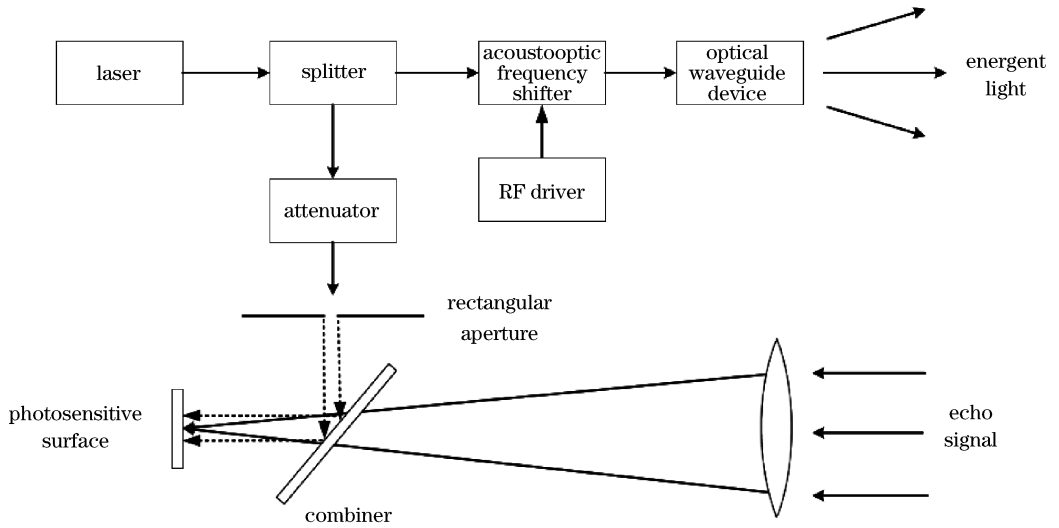


图 4 外差探测系统示意图

Fig. 4 Schematic diagram of heterodyne detection system

4 两种接收方案的比较

4.1 信噪比的大小

对于直接探测方案,由 2.1 节的分析可知,在室外环境中,由于天空背景噪声的存在,信噪比为

$$V_{\text{SNR1}} = \frac{P_r}{P_{\text{BK}}} = \frac{0.6 \mu\text{W}}{0.4 \mu\text{W}} = 1.8 \text{ dB}. \quad (4)$$

外差探测具有很窄的滤波带宽,利用外差探测方式时,从光混频器输出的能被光电检测器检测到的频段只有中频信号,则只有中频段的干扰信号能进入中频放大器,可以很大程度抑制太阳光等背景光干扰。且相比直接探测采用的滤光片,外差探测有更窄的接收带宽,因此,外差探测的带宽极窄,进入检测系统的背景光噪声可忽略。因此,外差探测噪声主要有散粒噪声和热噪声。外差探测系统的信噪比可表示为:

$$V_{\text{SNR2}} = \frac{\langle i_{\text{IF}}^2 \rangle}{\sigma_s^2 + \sigma_T^2} = \frac{2R^2 P_s P_{\text{Lo}}}{2q[I_d + R(P_{\text{Lo}} + P_s)]B + 4(K_B T/R_L)B}, \quad (5)$$

式中, i_{IF} 为信号电流, σ_s^2 为散粒噪声, σ_T^2 为热噪声, P_s 为信号功率, P_{Lo} 为本振光功率, R 为探测器的响应度, I_d 为暗电流, q 是电子电荷, B 为中频放大器带宽, K_B 为玻尔兹曼常数, T 为电阻温度, R_L 为负载电阻阻值。

参数设为:探测器响应度 $R=0.2 \text{ A/W}$,激光器输出功率 1 W ,光学孔径 14 mm ,探测距离 $R_m=50 \text{ m}$,波导透射率:50%,电子电荷 $q=1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$,探测器暗电流 $I_d=8 \text{ nA}$,滤波器带宽 $B=1 \text{ MHz}$,玻尔兹曼常数 $K_B=1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$,温度 $T=290 \text{ K}$,负载电阻 $R_L=10 \text{ k}\Omega$ 。计算接收系统信噪比随本振光功率的变化。

可以看出本振光功率达到 $60 \mu\text{W}$ 时,信噪比为 14 dB ,大于直接探测的信噪比。可见外差探测有利于微弱信号的探测,能够提高信噪比。

4.2 探测方案的实现条件

虽然光外差探测有上述的优点,但是对于实际系统来说,信号光与本振光必须满足一定的条件,才能实现光外差探测。信号光与本振光必须具有相同的模式结构,必须同偏振,能流矢量必须尽可能的保持一致,波前还必须满足曲率匹配。因此相干探测与直接探测相比对光源和空间条件方面的要求极高。此外,若在大气中实现光外差探测,除了大气湍流、大气分子的吸收作用、大气分子及大气中悬浮粒子对光的散射作用与直接探测一样使光能量衰减,使接收到的光信号变弱之外,大气湍流作用还将严重破坏光外差探测所需要的光的相干性。因此,虽然外差探测具有很多的优点,但实现起来有一定的难度。

与光外差方法相比,直接探测较为简单实用、可靠性高,但在直接探测中,探测器不能区别信号光与背景光,因此不适用于微弱光的探测。

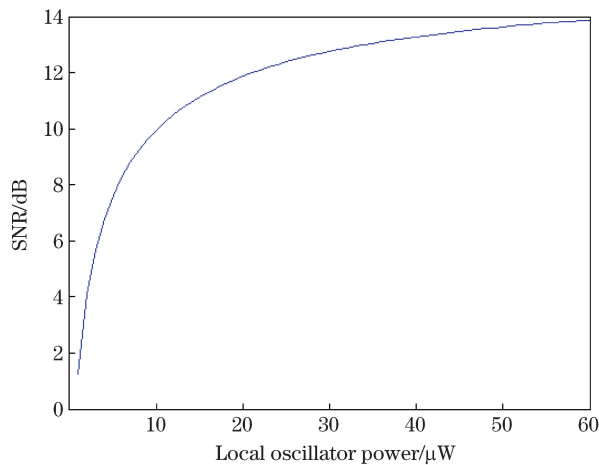


图 5 信噪比随本振光功率的变化

Fig. 5 Changes of SNR with the local oscillator

5 结 论

基于西安电子科技大学研制的 AlGaAs 光波导相控阵电光扫描系统,设计了直接探测与外差探测两种接收系统并进行了分析比较,最后得出结论:当使用环境背景噪声较小时,使用直接探测接收方案较为稳定可靠;当背景噪声较强,回波信号比较微弱时,采用外差探测接收方案较为合适,能够有效提高接收系统的信噪比。

参 考 文 献

- Dai Yongjiang. The Principle of Laser Radar[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002.
戴永江. 激光雷达原理[M]. 北京:国防工业出版社, 2002.
- Lei Yutang. Photoelectric Detection Technology (The Second Edition)[M]. Beijing: China Metrology Press, 2009.
雷玉堂. 光电检测技术(第2版)[M]. 北京:中国计量出版社, 2009.
- An Yuying, Zeng Xiaodong. Photoelectric Detection Principle[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2004.
安毓英,曾晓东. 光电探测原理[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2004.
- Xue Jingjing. Control Method and Experimental Research of Waveguide Phased Array Scanning[D]. Xi'an: Xidian University, 2013.
薛婧婧. 光波导相控阵扫描控制方法与实验研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2013.
- Li Jing. Waveguide Optical Phased Array Beam Analysis and Optimization[D]. Xi'an: Xidian University, 2012.
李 瑾. 光波导光学相控阵光束分析与优化[D]. 西安:西安电子科技大学, 2012.
- Liang Huawei. Theoretical and Experimental Study on Optical Waveguide Phased Array Technology[D]. Xi'an: Xidian University, 2007.
梁华伟. 光波导光学相控阵技术的理论和实验研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2007.
- Jiang Keli. Design of Optical Receiving System for Monostatic or Bistatic Laser Radar[D]. Xi'an: Xidian University, 2008.
蒋克丽. 单、双基地激光雷达光学接收系统设计[D]. 西安:西安电子科技大学, 2008.
- An Yuying. Optoelectronic Technology [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2012.
安毓英. 光电子技术[M]. 北京:电子工业出版社, 2012.
- Shi Yubin, Ma Haotong, Ma Yanxing, *et al.*. Numerical simulation of high accuracy and high efficiency beam steering based on liquid crystal optical phase array[J]. Chinese J Lasers, 2014, (2): 0202002.
师宇斌,马浩统,马阎星,等. 基于液晶相控阵高精度高效率光束偏转数值仿真[J]. 中国激光, 2014, (2): 0202002.
- Liu Cangli, Zhang Dayong, Luo Yongquan, *et al.*. Optimized analysis of diffraction efficiency for liquid crystal optical phased array [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(11): 1123002.
刘仓理,张大勇,骆永全,等. 液晶相控阵衍射效率的优化分析[J]. 光学学报, 2013, 33(11): 1123002.
- Zhuo Jingyi, Kong Lingjiang, Zhou Jianhua, *et al.*. Phase recovery algorithm based on iteration of a liquid crystal phased array [J]. Acta Optica Sinica. 2014, 34(5): 0505001.
卓静一,孔令讲,周建华,等. 一种液晶相控阵中基于迭代的相位恢复算法[J]. 光学学报, 2014, 34(5): 0505001.
- Duan Jiashu, Zhao Xiangjie, Zhang Dayong. Design of optical phased arrays amplifier stage based on volume holographic grating [J]. Acta Optica Sinica. 2014, 34(4): 0405002.
段佳著,赵祥杰,张大勇. 基于体全息光栅的光学相控阵放大级设计[J]. 光学学报, 2014, 34(4): 0405002.