

全光纤激光雷达发射和接收光学系统设计与优化

杨宏志 赵长明 张海洋* 杨苏辉 郑 征 郑星元 张德华

北京理工大学光电学院, 北京 100081

摘要 根据全光纤激光雷达特性设计与优化发射和接收光学系统。针对全光纤激光雷达光学系统中的激光高斯传输特性、扩展目标特性和光纤收发特性,修正激光雷达方程中的发射天线增益和目标反射截面,引入光纤接收效率参数。修正后的发射天线增益与目标处光斑大小的平方成反比,漫反射目标的雷达反射截面取决于目标反射率和激光入射角。实验探究了回波功率与接收光纤芯径的关系,得到了最佳光纤芯径。修正后的激光雷达方程可准确计算光纤收发条件下激光的回波功率,为后续的信号处理提供精确的理论支持。

关键词 光纤光学; 全光纤激光雷达; 激光雷达方程; 光纤接收效率

中图分类号 TN958.98 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.1106005

Design and Optimization of All-Fiber Lidar Transmitting and Receiving Optical Systems

Yang Hongzhi Zhao Changming Zhang Haiyang Yang Suhui

Zheng Zheng Zheng Xingyuan Zhang Dehua

School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

Abstract According to the characteristics of the all-fiber lidar, the transmitting and the receiving optical systems are designed and optimized. Aiming at the characteristics of the laser Gauss transmission, the extended target and the optical fiber transceiver of the all-fiber lidar optical system, the transmitting antenna gain and the target reflection cross-section in the lidar equation are modified, and the fiber reception efficiency is introduced. The modified transmitting antenna gain is inversely proportional to the square of the target spot size. The radar reflection cross-section of the diffuse reflection target depends on the target reflectivity and the laser incidence angle. The relationship between the echo power and the core diameter of the reception fiber is explored in experiment, and the optimum fiber core diameter is obtained. The modified lidar equation can calculate the laser echo power from the optical fiber transceiver accurately and provide precise theoretical support for subsequent signal processing.

Key words fiber optics; all-fiber lidar; lidar equation; fiber reception efficiency

OCIS codes 060.2310; 010.0280; 010.3640

1 引 言

激光雷达具有分辨率高、单色性好、方向性好、抗干扰能力强等优点,与传统的微波雷达相比,可实现更高的探测精度^[1-4]。光纤以及光纤器件以其损耗低、重量轻、体积小等特点得到迅猛发展。光纤器件广泛应用于激光雷达系统中,如光纤激光器、光纤环形器、光纤声光调制器、光纤接口的收发光学系统等^[5-8]。与传统的收发光学系统相比,光纤接口的收发光学系统有很多优势,如可实现光学系统与光电探测器的分离,结构设计更为简便;光纤芯径通常在微米量级,探测器光敏面较小,背景引入的噪声低;激光回波接收到光纤

收稿日期: 2016-05-09; 收到修改稿日期: 2016-06-24

基金项目: 国家自然科学基金(61308054)

作者简介: 杨宏志(1990—),男,博士研究生,主要从事激光雷达技术方面的研究。E-mail: yhzbit@163.com

导师简介: 赵长明(1960—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事新型激光器与激光雷达技术方面的研究。

E-mail: zhaochangming@bit.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: ocean@bit.edu.cn

中,便于后续处理,如光纤放大、相干处理等。

设计全光纤激光雷达发射和接收光学系统时,利用经典激光雷达方程计算回波功率的方法并不完善^[9-10],主要体现在以下三个方面:1) 发射激光通常为高斯光束,其横截面的振幅分布符合高斯函数,光斑大小沿光的传输方向按双曲线规律变化;2) 由于受光纤芯径的限制,回波功率未被光纤完全接收;3) 目标在各个方向的散射光强度近似满足朗伯体余弦定律(即扩展目标下目标特性接近朗伯体,散射光强并非在 2π 立体角内均匀分布)。为了弥补上述方法的不足,本文进行了以下研究:1) 根据高斯光束的传输特性,得到空间某位置处光斑大小由束腰半径以及该位置与束腰的相对距离决定,而经典激光雷达中的光斑由发散角以及发散距离决定,不符合高斯光束的特性;2) 发射和接收光学系统的横向放大率可能不同,在考虑光纤特性的情况下引入光纤接收效率,探究光纤芯径与回波功率的关系;3) 假设扩展目标具有漫反射特性,计算目标的雷达反射截面以及空间各方向的散射强度。基于上述研究内容,详细推导了光纤激光雷达中发射天线增益、目标反射截面、目标散射特性和光纤接收效率;修正了激光雷达的设计参数;准确计算了光纤激光雷达的回波功率;实验验证了接收光纤芯径对回波功率的影响。本文优化了全光纤结构的激光雷达发射和接收光学系统,为后续工程样机的研制提供了理论和实验基础。

2 光学系统设计

光纤激光雷达主要由发射光学系统、接收光学系统、目标和信号处理系统组成。主要从理论上描述发射光学系统、接收光学系统、目标与激光回波功率之间的关系。发射光学系统中光纤激光器与单模光纤连接,接收光学系统由多模光纤接收,使用光功率计测量回波信号。

2.1 发射光学系统

发射光学系统原理图如图 1 所示。

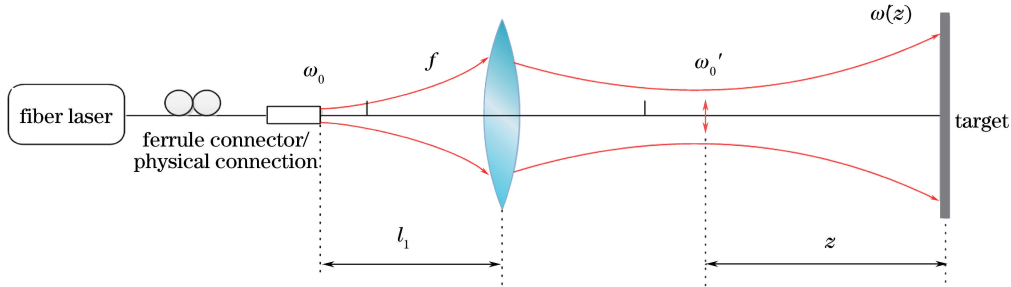


图 1 发射光学系统原理图

Fig. 1 Schematic of transmitting optical system

激光雷达发射光学系统采用单片非球面透镜对发射激光准直聚焦。假定激光的束腰半径 $\omega_0 = 3.1 \mu\text{m}$,发散角由单模光纤的数值孔径 NA 决定($NA = 0.14$),激光波长为 λ ,透镜焦距为 f ,光纤端面距透镜的距离为 l_1 ,像方的束腰半径为 ω'_0 。根据高斯光束的变换规律,单片非球面透镜准直后像方束腰半径平方的表达式为

$$\omega_0'^2 = f^2 \omega_0^2 / [(f - l_1)^2 + (\pi \omega_0^2 / \lambda)^2] \quad (1)$$

根据高斯光束的传输特性,光斑大小沿光的传输方向按双曲线规律变化,当像方束腰与目标距离为 z 时,关于目标处光斑半径 $\omega'(z)$ 的方程式为

$$\omega'(z) / \omega_0' - z^2 / (\pi \omega_0'^2 / \lambda)^2 = 1 \quad (2)$$

调节物方束腰与透镜的距离,使激光以尽可能准直的状态发射($l_1 = f$),可得

$$\omega_0' = \lambda f / (\pi \omega_0) \quad (3)$$

根据(2)、(3)式,得到像方光斑半径与目标距离、发射光纤芯径的关系为

$$\omega'(z) = \frac{\lambda f}{\pi \omega_0} \sqrt{1 + \left(\frac{z \pi \omega_0^2}{\lambda f^2} \right)^2} \quad (4)$$

由(4)式可得,当发射光纤芯径 $\omega_0 = [\lambda f^2 / (\pi z)]^{1/2}$ 时, $\omega'(z)$ 最小。随着发射光纤芯径的增大,目标处

光斑半径先减小后增大,存在最小值,且最小值随着目标距离 z 的增大而减小。

由(4)式得到的修正激光雷达方程中发射天线增益为

$$G_T = 4\pi/\theta_T^2 = 4\pi R^2 / (\theta_T^2 R^2) = 4\pi R^2 / \omega'(z)^2, \quad (5)$$

式中 θ_T 为发射激光发散角, R 为激光雷达到目标的距离(也称工作距离)。修正前发射天线增益 $G_T = 4\pi/\theta_T^2$ 。不同于平面波,高斯激光在大气中传播时,各处半径的包络线为一个双曲面。使用高斯光束发散角描述发射天线增益会引入误差。为消除误差,利用目标处光斑半径和工作距离修正发射天线增益,修正后的发射天线增益与光斑半径的平方成反比,与工作距离的平方成正比。

2.2 接收光学系统

2.2.1 基本组成

接收光学系统包括光纤、光纤准直镜、主/次镜组成的伽利略望远系统三部分。对接收光学系统进行优化设计,可消除轴上点球差,达到近衍射极限。接收光学系统的设计参数为:准直镜(材料为 H-ZF10)的焦距为 18.4 mm,直径为 11 mm;伽利略系统目镜(材料为 JGS1)的焦距为 -11 mm,直径为 13 mm;物镜(材料为 H-ZF10)的焦距为 220 mm,直径为 96 mm;光学系统有效接收孔径为 80 mm。接收光学系统的光路如图 2 所示。

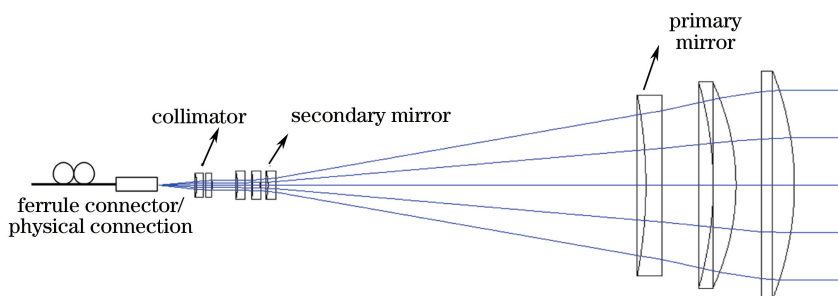


图 2 接收光学系统光路图

Fig. 2 Optical path of receiving optical system

2.2.2 光学特性

接收光学系统用于接收目标的散射回波,回波信号通过伽利略望远系统聚焦,再通过聚焦镜第二次聚焦,聚焦后的激光被光纤端面接收。为尽可能多地接收激光功率,设计接收光学系统的接收孔径 $D = 80$ mm。由于接收光纤芯径通常为微米量级,因此需要采用两级会聚实现米量级的目标光斑转换至微米量级的光纤端面,经两级会聚后可以有效地将回波会聚到光纤中。通过 Zemax 光学设计软件优化,改变次镜与主镜之间的距离时,不同工作距离处的激光束可以聚焦到光纤端面。根据激光束束腰变换理论计算光学系统的束腰位置、束腰大小和横向放大率之间的关系,如图 3 所示。

为了更加准确地描述接收光学系统的光学特性,假定其端面连接单模光纤,通过调节主次镜之间的距离,在 80~200 m 范围内观察激光的会聚特性。图 4 为不同工作距离、不同视场的接收光学系统点列图。以图 4(a)为例,可以看出中心视场、 0.05° 视场、 0.1° 视场和 0.15° 视场的点列图均方根最大为 $437 \mu\text{m}$ (彩色圆

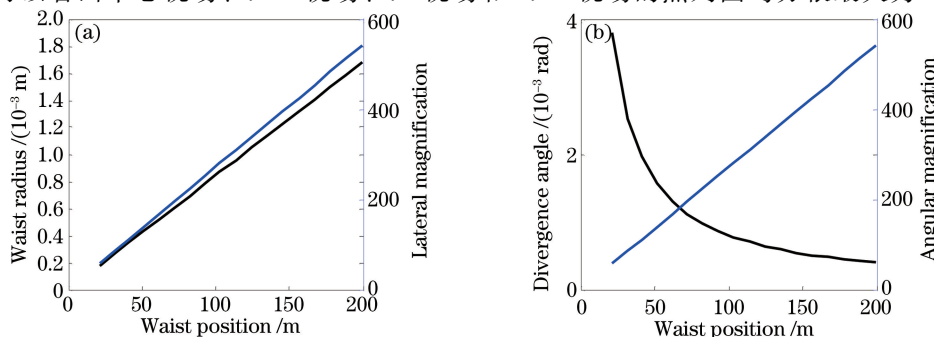


图 3 (a) 束腰位置、束腰半径与横向放大率之间的关系;(b) 束腰位置、发散角与角度放大率之间的关系

Fig. 3 (a) Relationship among waist position, waist radius and lateral magnification; (b) relationship among waist position, divergence angle and angular magnification

环),小于艾里斑半径(黑色圆圈)。因此,在 80~200 m 的工作距离下,弥散斑半径相对较小,理论上返回的激光光束可有效聚焦到接收光纤端面。

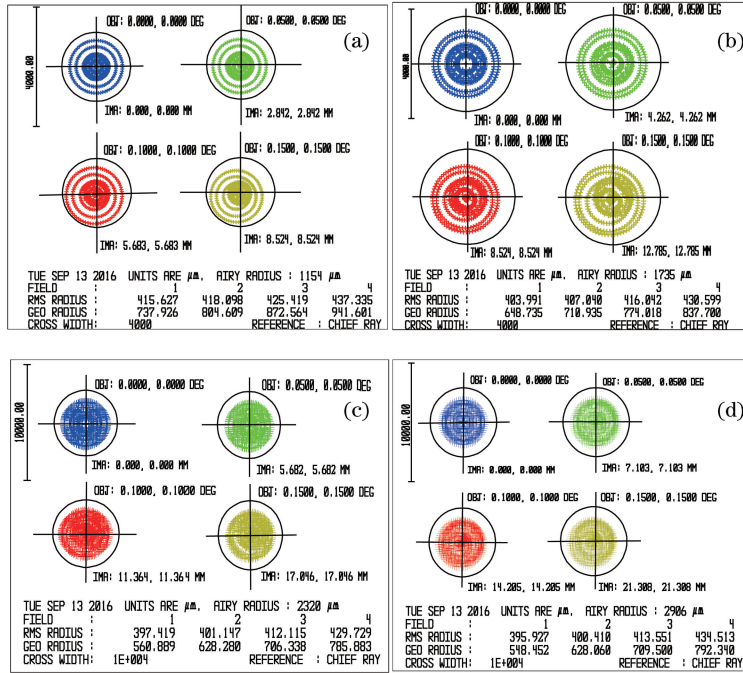


图 4 接收光学系统不同工作距离处的点列图。(a) 80 m;(b) 120 m;(c) 160 m;(d) 200 m

Fig. 4 Spot diagrams of receiving optical system at different working distances. (a) 80 m; (b) 120 m; (c) 160 m; (d) 200 m

2.2.3 接收效率

由物像共轭关系可知,像面上的激光在光纤端面处成像,满足光纤数值孔径和芯径条件的回波可以被光纤端面接收。通常,目标上的激光强度分布 $I(r)$ 满足

$$I(r) = I_0^2 \exp[-2r^2/\omega'^2(z)], \quad (6)$$

式中 I_0 为光斑中心处的光强, r 为光斑半径。

当 $\omega'(z)/\beta \geq \omega$ (ω 为接收光纤芯径) 时,接收光学系统的接收效率 η_r 可以表示为

$$\eta_r = \frac{\int_0^{\omega\beta} I(r) dr}{\int_0^{\omega'(z)} I(r) dr} = \frac{\int_0^{\omega\beta} \exp[-2r^2/\omega'^2(z)] dr}{\int_0^{\omega'(z)} \exp[-2r^2/\omega'^2(z)] dr}. \quad (7)$$

根据激光的高斯强度分布,对目标上不同半径处的激光进行积分。光纤接收效率与目标处光斑大小、接收光学系统的横向放大率之间的关系如(7)式所示。当 $\omega'(z)/\beta < \omega$ 时,光纤接收效率为 1。

2.3 目标靶面特性

2.3.1 激光雷达反射截面计算

激光雷达反射的几何示意图如图 5(a)所示。定义双向反射分布函数为 (θ_d, ϕ_d) 方向上接收的辐射亮度 dL_r 与在 (θ_i, ϕ_i) 方向上立体角 $d\omega_i$ 内入射光的辐照度 dE_i 之比。双向反射分布函数表达式为

$$f_r(\theta_i, \phi_i; \theta_d, \phi_d) = \frac{dL_r(\theta_i, \phi_i; \theta_d, \phi_d; E_i)}{dE_i(\theta_i, \phi_i)}. \quad (8)$$

朗伯体辐射空间坐标如图 5(b)所示。设目标靶面为漫反射板,根据朗伯体特性,双向反射分布函数 $f_r = \rho/\pi^{[11]}$ (ρ 为目标反射率)。激光雷达反射截面 σ 可表示为

$$\sigma = \iint_A d\sigma = \iint_A 4\pi f_r \cos \alpha_i \cos \alpha_r dA = \iint_A 4\rho \cos \alpha_i \cos \alpha_r dA, \quad (9)$$

式中 A 为光学系统的接收面积, α_i, α_r 分别为激光相对于目标的入射角和反射角。由于发射光学系统、接收光学系统的间隔和目标靶面上激光光斑都远小于工作距离,可近似认为 $\alpha_i = \alpha_r$ 且它们都为常数,可得

$$\sigma = 4\rho A \cos^2 \alpha_i \quad (10)$$

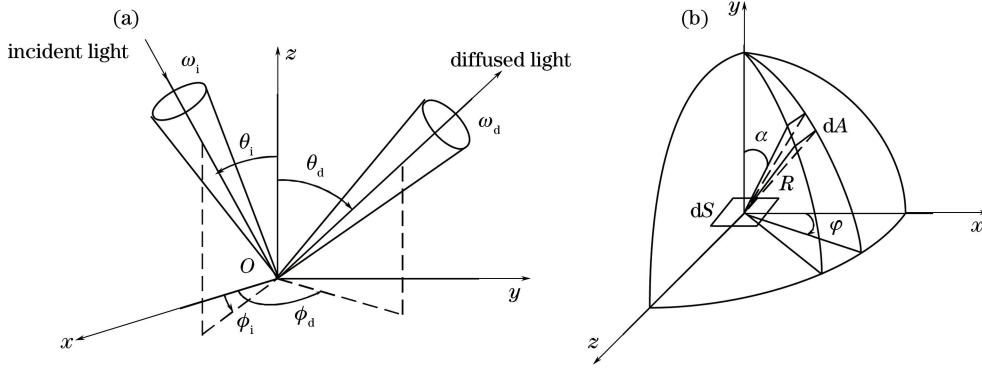


图 5 (a)激光雷达反射几何示意图;(b)朗伯体辐射空间坐标

Fig. 5 (a) Geometric diagram of lidar reflection; (b) space coordinates of Lambert radiation

2.3.2 目标漫反射与光学系统接收^[12]

如图 5(b)所示,极坐标对应球面上面元 dA 的立体角 $d\Omega$ 为

$$d\Omega = R^{-2} dA = \sin \alpha d\alpha d\varphi, \quad (11)$$

式中 α 为漫反射板与接收方向的夹角, φ 为接收方向在 xy 平面的投影与 x 轴的夹角。

设半球内反射光通量为 P , 朗伯体反射的单位光通量 dP 的平方可表示为

$$d^2 P = L \cos \alpha dS d\Omega, \quad (12)$$

式中 L 为辐射亮度, dS 为朗伯体面元。将(11)式代入(12)式可得

$$d^2 P = L \cos \alpha \sin \alpha dS d\alpha d\varphi. \quad (13)$$

对(13)式作积分运算, 积分变量为 α, φ , 得到半球内反射光通量 P 为

$$P = L dS \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi/2} \cos \alpha \sin \alpha d\alpha = \pi L dS. \quad (14)$$

漫反射目标在面元 dA 的光学系统端面的回波功率为

$$P_r = \frac{d^2 P}{P} P = \frac{\cos \alpha dA}{\pi R^2} P. \quad (15)$$

由(15)式可知, 当光学系统接收面积为 dA 、工作距离为 R 、漫反射板与接收方向的夹角为 α 时, 回波功率与工作距离的平方成反比, 与 $\cos \alpha$ 和接收面积成正比。在经典的激光雷达方程中, 目标的散射光强在 2π 立体角范围内均匀分布, 即各个方向上散射光强相同。但是对于大多数目标, 散射光强更加贴近朗伯体余弦分布。因此, 根据朗伯体散射特性修正激光雷达方程中的散射光强。

2.4 激光雷达方程

经典的激光雷达方程为

$$P_R = \frac{P_T G_T}{4\pi R^2} \times \frac{\sigma}{4\pi R^2} \times \frac{\pi D^2}{4} \times \eta_{atm} \times \eta_{sys}, \quad (16)$$

式中 P_R 为接收光功率, P_T 为发射光功率, G_T 为发射天线增益, η_{atm} 为大气传输系数, η_{sys} 为激光雷达光学系统的传输系数。

针对经典激光雷达方程, 详细讨论了三个问题: 1) 激光为高斯光束时的发射天线增益; 2) 光纤的接收效率与接收光纤芯径、收发光学系统横向放大率之间的关系; 3) 目标为朗伯体时的雷达反射截面和散射特性。

根据高斯光束特性和激光雷达方程, 发射天线增益修正为(5)式, 光纤接收效率修正为(7)式, 目标雷达散射截面修正为(10)式, 目标的散射光修正为(15)式。因此, 光纤的接收功率为

$$P_R = \frac{P_T G_T}{4\pi R^2} \times \sigma \times \frac{\cos \alpha \cdot D^2}{4R^2} \times \eta_r \times \eta_{atm} \times \eta_{sys}. \quad (17)$$

(17)式可进一步化简为

$$P_R = P_T \times \cos^3 \alpha \times \rho \times (D^2/R^2) \times \eta_r \times \eta_{total}, \quad (18)$$

式中 η_{total} 为光学系统透射率。根据上述公式可知,接收回波功率与发射功率、激光入射角余弦的三次方、目标反射率、光学系统接收孔径的平方成正比,与工作距离的平方成反比。

3 实验设计

发射激光经过发射光学系统准直发射,目标反射回波被接收光学系统接收,光功率计测量激光回波功率,此过程的实验原理图如图 6 所示。

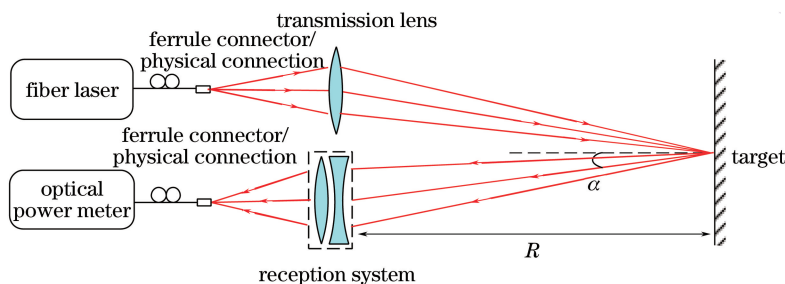


图 6 实验原理图

Fig. 6 Schematic of experiment setup

实验采用输出波长为 1064 nm 的单频光纤激光器,最大功率为 1 W,线宽小于 2 kHz;单模光纤输出到光学系统端面,调节激光和发射透镜的距离;目标采用反射率为 50% 的漫反射板;激光回波经接收透镜组耦合进入光纤,接收光学系统孔径 $D=80$ mm;光纤芯径可变;光学系统透射率为 40% (包括收发光学系统和大气透射率)。

4 实验结果及分析

图 7 为理论和实验得到的回波功率与光纤芯径、发射功率之间的关系。当发射激光功率为 17.5 mW、工作距离为 75 m 时,回波功率与接收光纤芯径之间的关系如图 7(a) 所示。当接收光纤芯径为 100 μm 、工作距离为 75 m 时,回波功率与激光发射功率之间的关系如图 7(b) 所示。从图 7(a) 可以看出,接收光纤芯径小于 300 μm 时,回波功率的理论值与测量值较为吻合;接收光纤芯径超过 300 μm 后,测量值逐渐高于理论值。上述现象主要是由于随着接收光纤芯径的增大,除了激光回波可能被光学系统接收,一些杂散光也可能被接收。因此,在考虑使用大光纤芯径的同时,也需要考虑杂散光对后续信号处理的影响。图 7(b) 为发射功率与接收功率之间的关系,可以看出理论与测量结果较为吻合。

理论计算得到的目标处光斑直径对回波功率的影响如图 8(a) 所示。可以看出,随着目标处光斑直径的增大,回波功率减小。仿真了发射激光和目标靶面入射角对回波功率的影响,如图 8(b) 所示。随着激光入射角的增大,回波功率减小。

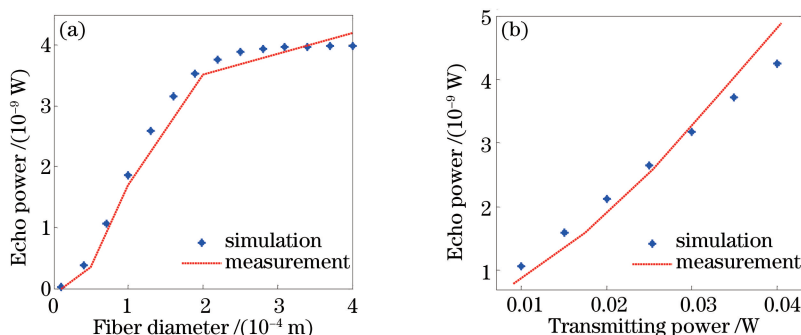


图 7 (a) 回波功率与接收光纤芯径之间的关系; (b) 回波功率与激光发射功率之间的关系

Fig. 7 (a) Relationship between echo power and core diameter of receiving fiber; (b) relationship between echo power and laser transmitting power

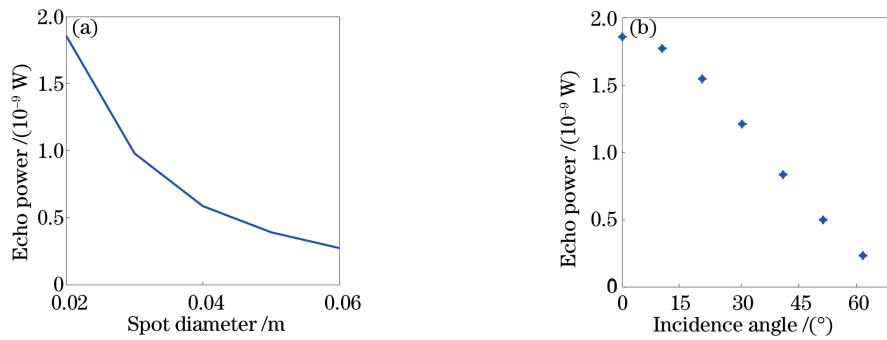


图 8 (a)光斑直径对回波功率的影响;(b)激光入射角对回波功率的影响

Fig. 8 (a) Effect of spot diameter on echo power; (b) effect of laser incidence angle on echo power

5 结 论

针对全光纤激光雷达特性,优化设计发射和接收光学系统,修正激光雷达方程。发射天线增益修正为目标光斑大小和工作距离的函数。根据光纤特性引入光纤接收效率,验证了接收光纤芯径对回波功率的影响。一般情况下,当接收光纤芯径选择 $\omega(z)/\beta$ 时,可尽可能多地接收到回波信号。修正后的激光雷达方程可准确计算光纤收发下激光的回波功率,为后续的信号处理提供基础。

参 考 文 献

- Jia Xiaodong, Sun Dongsong, Shu Zhifeng, *et al.* Optimal design of the telescope in coherent lidar and detection performance analysis[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(3): 0301001.
贾晓东, 孙东松, 舒志峰, 等. 相干激光雷达中望远镜的优化及探测性能分析[J]. *光学学报*, 2015, 35(3): 0301001.
- Pu Lili, Zhou Yu, Sun Jianfeng, *et al.* Receiving characteristics of coherent lidar under partially coherent condition[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(12): 1228002.
濮莉莉, 周煜, 孙剑锋, 等. 激光雷达部分相干外差探测接收特性研究[J]. *光学学报*, 2011, 31(12): 1228002.
- Zheng Yongchao, Zhao Mingjun, Zhang Wenping, *et al.* Trend of laser radar technology development[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(s): 240-246.
郑永超, 赵铭军, 张文平, 等. 激光雷达技术及其发展动向[J]. *红外与激光工程*, 2006, 35(s): 240-246.
- Peng Zhangxian, Liu Bo, Yue Yongjian. Optical system design of monostatic non-scanning Doppler wind lidar[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27(9): 091010.
彭章贤, 刘博, 岳永坚. 非扫描测风激光雷达光学系统设计[J]. *强激光与粒子束*, 2015, 27(9): 091010.
- Karlsson C J, Olsson F A A, Letalick D, *et al.* All-fiber multifunction continuous-wave coherent laser radar at 1.55 μm for range, speed, vibration, and wind measurements[J]. *Applied Optics*, 2000, 39(21): 3716-3726.
- Philippov V, Codemard C, Jeong Y, *et al.* High-energy in-fiber pulse amplification for coherent lidar applications[J]. *Optics Letters*, 2004, 29(22): 2590-2592.
- Gao Po, Hu Yihua, Zhao Nanxiang, *et al.* Accuracy analysis of all-fiber differential absorption lidar for atmospheric component[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(3): 0301003.
高坡, 胡以华, 赵楠翔, 等. 全光纤差分吸收激光雷达大气成分探测精度分析[J]. *光学学报*, 2014, 34(3): 0301003.
- Zhao Mingbo, He Jun, Fu Qiang. Simulation modeling and analysis of full-waveform lidar signatures[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(6): 0628002.
赵明波, 何峻, 付强. 全波形激光雷达回波信号建模仿真与分析[J]. *光学学报*, 2012, 32(6): 0628002.
- Qu Zengfeng, Jin Chenfei, Zhao Yuan, *et al.* Theoretical analysis of structure and operation range calculation of a novel fiber lidar[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(2): 300-303.
屈增风, 靳辰飞, 赵远, 等. 新型光纤激光雷达的结构理论分析与作用距离计算[J]. *红外与激光工程*, 2009, 38(2): 300-303.
- Dai Yongjiang. The principle of lidar[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002: 8-11.
戴永江. 激光雷达原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002: 8-11.
- Wu Zhensen, Han Xiang'e, Zhang Xiangdong, *et al.* Experimental study on bidirectional reflectance distribution function

of laser scattering from various rough surfaces[J]. Acta Optica Sinica, 1996, 16(3): 262-268.

吴振森, 韩香娥, 张向东, 等. 不同表面激光双向反射分布函数的实验研究[J]. 光学学报, 1996, 16(3): 262-268.

- 12 Jin Weiqi, Hu Weijie. Irradiance, photometric and colorimetric measurement[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2009: 28-33.

金伟其, 胡威捷. 辐射度光度与色度及其测量[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2009: 28-33.