

# 全光纤差分吸收激光雷达大气成分探测精度分析

高 坡 胡以华 赵楠翔 王 勇 李 政

(解放军电子工程学院脉冲功率激光技术国家重点实验室, 电子制约技术安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230037)

**摘要** 为了提高全光纤差分吸收激光雷达的探测精度, 研究近距离探测条件下使用光环形器的差分吸收激光雷达, 这对提高气体探测精度具有重要的意义。分析了差分吸收激光雷达的探测精度与激光回波能量测量的关系, 发现近距离条件下的气体探测精度将会受到环形器“串音”的影响, 分析了不同探测高度下串音对探测精度的影响程度。结合 CO<sub>2</sub> 浓度探测的实例并通过仿真计算, 得到了信噪比与探测相对误差随探测高度的变化曲线。结果表明, 环形器中存在的“串音”会干扰激光回波信号, 对探测信噪比与精度产生严重影响。该研究对设计与完善全光纤差分吸收激光雷达系统具有重要的借鉴意义。

**关键词** 大气光学; 探测精度; 差分吸收; 环形器; 串音

**中图分类号** TN958.98 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0301003

## Accuracy Analysis of All-Fiber Differential Absorption Lidar for Atmospheric Component

Gao Po Hu Yihua Zhao Nanxiang Wang Yong Li Zheng

(State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Key Laboratory of Electronic Restriction of Anhui Province, Electronic Engineering Institute, Hefei, Anhui 230037, China)

**Abstract** In order to improve the detection accuracy of all-fiber differential absorption lidar (DIAL), it is very important to develop configuration of all-fiber DIAL system with circulator at close range. Relationship between detection accuracy of DIAL and laser echo energy is analyzed. At close range, crosstalk of circulator affects the detection accuracy. The influence of crosstalk on detection accuracy is analyzed at different heights. Combined with the example of CO<sub>2</sub> concentration detection and simulation, signal to noise rate (SNR) and relative error with height are analyzed. The research shows that crosstalk can interfere with laser echo and seriously affect detection SNR and accuracy. The study has important significance on the design and improvement of all-fiber DIAL system.

**Key words** atmospheric optics; detection accuracy; differential absorption; circulator; crosstalk

**OCIS codes** 280.1910; 010.3640; 280.3640; 010.1290

## 1 引 言

全光纤激光雷达作为一种新型的探测手段已经广泛应用于三维风场测量、目标测速、气体浓度检测等领域中。近年来, 由于全光纤差分吸收激光雷达系统结构简单、系统稳定度好、探测灵敏度高等优点, 已得到广泛的应用, 对其系统结构与应用特性的研究也越来越多<sup>[1-6]</sup>。

以往的研究主要集中于差分吸收激光雷达整体探测精度的分析、系统实验数据处理等<sup>[7-8]</sup>, 而对于全光纤差分吸收激光雷达(DIAL)本身设计对探测精度影响的研究较少。通过研究发现, 光环形器因其具有优良的单向传输能力, 常作为一种简单实用的光学器件, 被用于全光纤激光雷达系统的光学收发天线收发开关<sup>[1-2,9]</sup>。

**收稿日期**: 2013-09-04; **收到修改稿日期**: 2013-11-06

**基金项目**: 国家自然科学基金(61271353)、安徽省自然科学基金(1308085QF123)

**作者简介**: 高 坡(1988—), 男, 硕士研究生, 主要从事微弱光信号检测与处理方面的研究。

E-mail: skl\_gaopo@163.com

**导师简介**: 胡以华(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事空间信息和光电信息处理方面的研究。

E-mail: skl\_hyh@163.com(通信联系人)

但是,如果系统应用于对城市中的气体污染或森林中 CO<sub>2</sub> 等探测时,由于探测距离较近,环形器中存在“串音”会干扰激光回波信号,从而对探测的信噪比与精度产生严重影响。本文将对差分吸收激光雷达系统信噪比与探测精度进行分析,探讨环形器的串音如何对气体探测产生影响。

## 2 差分吸收激光雷达大气成分探测精度与激光回波能量的关系

差分吸收技术基本原理:在全光纤差分吸收激光雷达系统中,激光器通过波长控制周期性地发出 λ<sub>on</sub>、λ<sub>off</sub> 两个不同波长的激光束,波长 λ<sub>on</sub> 选择在被测气体的吸收峰,波长 λ<sub>off</sub> 则选在气体吸收峰外。激光被大气吸收与散射,接收机接收其后向散射的激光回波信号。探测的回波方程为<sup>[10]</sup>

$$N_{e,on(R)} = N_{p,on} \eta \beta(\lambda_{on}, R) \Delta R A R^{-2} \times \exp\left[-2 \int_0^R \alpha_{on}(z) dz\right], \quad (1)$$

$$N_{e,off(R)} = N_{p,off} \eta \beta(\lambda_{off}, R) \Delta R A R^{-2} \times \exp\left[-2 \int_0^R \alpha_{off}(z) dz\right], \quad (2)$$

式中 ΔR = R<sub>2</sub> - R<sub>1</sub> 为空间取样距离且 R<sub>1</sub> < R<sub>2</sub>, N<sub>e,i(R)</sub> 是接收机接收到的 R ~ R + ΔR 段大气的激光回波在探测器上产生的光子数, N<sub>p,i</sub> 为单个激光脉冲所含的光子数, i 为 on, off, η 是系统接收效率常数, R 是探测距离, A 为望远镜接收面积, β(λ, R) 是大气中探测光的后向散射系数, α<sub>i</sub>(z) 是大气消光系数,且 α = σN<sub>w</sub>(z) + ε, 其中 σ 为吸收截面, N<sub>w</sub>(z) 为 CO<sub>2</sub> 浓度, ε 为除 CO<sub>2</sub> 吸收之外的消光系数。

两个波长的激光回波所携带的信息不同,经过

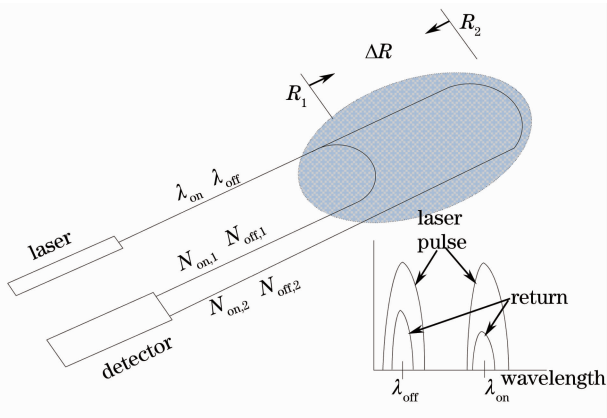


图 1 差分吸收激光雷达原理图  
Fig. 1 Schematic diagram of DIAL

信号处理就可以得到不同位置上的气体浓度,图 1 是差分吸收的原理图。因为 λ<sub>on</sub>、λ<sub>off</sub> 光波长相近,近似认为: β(λ<sub>on</sub>, R) = β(λ<sub>off</sub>, R), α(λ<sub>on</sub>, z) = α(λ<sub>off</sub>, z)。将(1)式和(2)式相除、取对数并进行微分运算,可得到气体浓度简化公式为<sup>[2]</sup>

$$N_w(R) = \frac{1}{2\Delta\sigma} \frac{d}{dR} \left[ \ln \frac{N_{e,off(R)}}{N_{e,on(R)}} \right], \quad (3)$$

式中 Δσ = σ<sub>on</sub> - σ<sub>off</sub> 为差分吸收截面。从(3)式中可以看出,气体探测精度取决于两波长激光回波能量,回波能量的探测越精确,气体探测精度越高。

## 3 应用环形器的全光纤差分吸收激光雷达系统分析

图 2 是全光纤差分吸收激光雷达的系统基本的结构图,激光器通过波长控制器周期性发出 λ<sub>on</sub>、λ<sub>off</sub> 两个不同波长的激光束。由于周期较短,可以看作 λ<sub>on</sub>、λ<sub>off</sub> 两束光是同时发出的,且大气参数相似。激光束经脉冲光纤激光放大器进行放大,后经光纤进入光环形器的端口 1,经端口 2 出射,再经收发一体发射天线发射到大气中。自激光束发出开始,望远镜就会不断地接收来自大气的后向散射回波信号,回波光进入环形器端口 2,后到达端口 3,经光纤进入光电倍增管(PMT),测出回波强度。后把数据进行处理,反演出 CO<sub>2</sub> 浓度。

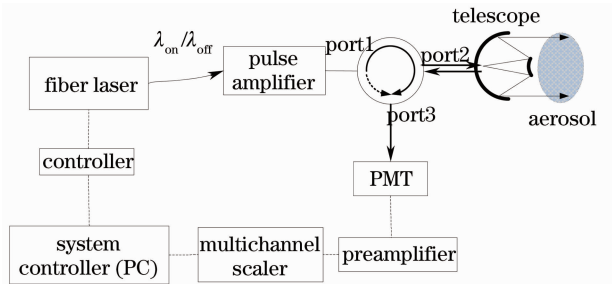


图 2 系统结构原理图

Fig. 2 Schematic diagram of system

系统设计中,望远镜接收孔径 D 是 200 mm,脉冲功率 p<sub>t</sub> 为 250 W,脉宽 τ<sub>0</sub> 为 400 ns,光环形器的“串音”为 60 dB(由端口 1 串扰到端口 3)。

如图 2 所示,由于环形器中存在“串音”,在单脉冲发射时间 τ<sub>0</sub> 内,发射的光脉冲将有一部分光由端口 1 直接“串”进端口 3,之后和望远镜不断接收的大气后向散射回波一起进入到探测器。所以,在激光开始发射的脉宽 τ<sub>0</sub> 的时间内,探测器接收的将是“串音”与回波信号的叠加信号。此处,“串音”干扰的引入将严重影响低层大气的探测信噪比与精度,

图 2 中实线表示光信号通路,虚线表示电信号通路。

### 3.1 探测系统信噪比分析

在光子计数方法中,信噪比定义为<sup>[11]</sup>

$$R_{SN} = \frac{N_S}{\sqrt{N_S + (N_B + N_D)}}, \quad (4)$$

式中  $N_S$  是回波信号的光子计数,  $N_S = M \cdot N_e$ ,  $N_B$  是背景辐射数,  $N_D$  是探测器暗电流计数。若是夜间探测  $N_B$  可忽略不计,  $N_D$  可表示为

$$N_D = M \cdot D_{cp} \cdot \frac{2\Delta R}{c}, \quad (5)$$

式中  $M$  是累计的激光脉冲数,  $D_{cp}$  是每秒的暗电流计数(约为  $20000 \text{ s}^{-1}$ ),  $c$  是光速。将(5)式代入(4)

$$\beta(R) = 0.8398 \times 10^{-3} \exp(-R/2) + 1.74 \times 10^{-6} \exp[-(R-20)^2/36] + 2 \times 10^{-5} \exp(-R/7), \quad (7)$$

$$\alpha(z) = 4.2 \times 10^{-2} \exp(-z/2) + 8.7 \times 10^{-5} \exp[-(z-20)^2/36] + 1.67 \times 10^{-4} \exp(-z/7). \quad (8)$$

考虑到脉冲能量为  $100 \mu\text{J}$ ,  $N_{p,on} = N_{p,off} = 100 \mu\text{J}/(h\nu) = 8 \times 10^{12}$ , 设探测器量子效率为  $5\%$ , 光学系统利用率为  $20\%$ , 接收面积  $A = (200 \text{ mm}/2)^2 \times 3.1416 = 3.1416 \times 10^{-2} \text{ m}^2$ , 脉冲累计数  $M = 6 \times 10^4$  次作为一组回波信号进行计算。

由于环形器在探测系统中的使用,在激光开始发射的脉宽  $\tau_0$  的时间内,即探测位置处在  $c \cdot \tau_0/2$  距离内,环形器的“串音”会夹杂在接收到的回波信号上。图 3 表示距离取样点  $R_1$ 、 $R_2$  都处在  $c \cdot \tau_0/2$  距离内,图 4 表示只有取样点  $R_1$  处在  $c \cdot \tau_0/2$  距离内,取样点  $R_2$  不在  $c \cdot \tau_0/2$  距离内。

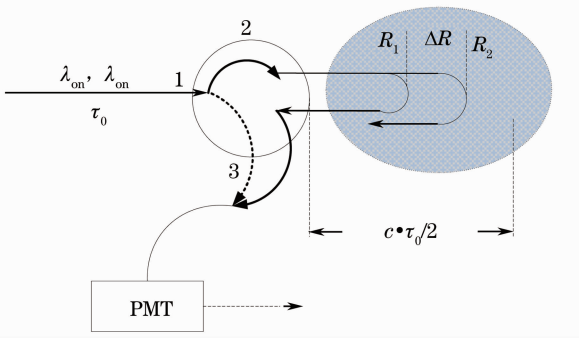


图 3 取样点  $R_1$ 、 $R_2$  位置 ( $R_1 < c \cdot \tau_0/2$ ,  $R_2 < c \cdot \tau_0/2$ )

Fig. 3 Sampling position of  $R_1$  and  $R_2$  ( $R_1 < c \cdot \tau_0/2$ ,  $R_2 < c \cdot \tau_0/2$ )

由于处在  $c \cdot \tau_0/2$  距离范围内的激光回波会叠加此“串音”干扰信号,(4)式的噪声项中需要加上此“串音”干扰项,信噪比计算将变为

$$R'_{SN} = \frac{N_S}{\sqrt{N_S + (N_B + N_D) + N'_S}}, \quad (9)$$

式中  $N'_S = 10^{-6} (N_{p,on}, N_{p,off}) = 8 \times 10^6$  是由于环形

式可得<sup>[2]</sup>

$$R_{SN} = \frac{N_e \sqrt{M}}{\sqrt{N_e + D_{cp} \cdot \frac{2\Delta R}{c}}}. \quad (6)$$

以  $\text{CO}_2$  气体探测为例,根据文献[2]的结论,在  $1572 \text{ nm}$  波长的大气模式下:假定  $1000 \text{ m}$  以下  $\text{CO}_2$  气体浓度随高度分布  $N_w(z) = N_0 \exp(-z/7)$ , 同时,暂定地表  $\text{CO}_2$  分子浓度  $N_0 = 1.048 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ,  $\lambda_{on}$  的吸收截面为  $6.36 \times 10^{-23} \text{ cm}^2$ ,  $\lambda_{off}$  的吸收截面为  $4.56 \times 10^{-24} \text{ cm}^2$ 。可以得到

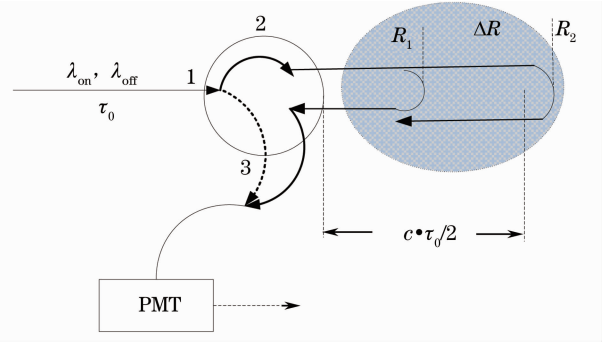


图 4 取样点  $R_1$ 、 $R_2$  位置 ( $R_1 < c \cdot \tau_0/2$ ,  $R_2 > c \cdot \tau_0/2$ )

Fig. 4 Sampling positions of  $R_1$ ,  $R_2$  ( $R_1 < c \cdot \tau_0/2$ ,  $R_2 > c \cdot \tau_0/2$ )

器中存在的“串音”产生了干扰信号。

根据以上描述,经过模拟计算,当选取不同的取样位置  $R_1$ 、 $R_2$  与取样距离  $\Delta R$  时,计算结果如图 5 所示。图中的虚线表示没使用环形器时[对应(4)式],系统信噪比随探测高度的变化。由上到下分别

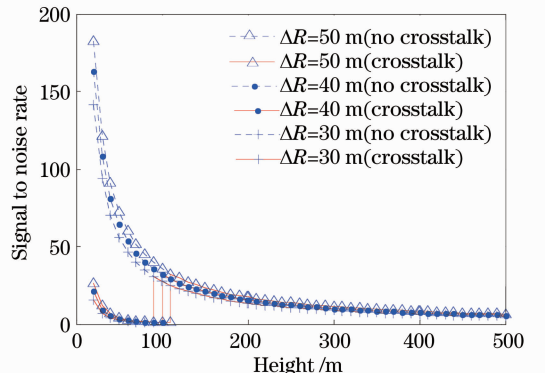


图 5 信噪比随高度变化曲线

Fig. 5 Variation of  $R_{SN}$  with height

对应的取样距离  $\Delta R$  为 50、40、30 m 时信噪比随距离的变化曲线。实线表示使用环形器时[对应(9)式]系统信噪比随探测高度的变化,由上到下分别对应取样距离  $\Delta R$  为 50、40、30 m 时信噪比随距离的变化曲线。

从图 5 中可以看出,取样距离  $\Delta R$  越长信噪比越高。对比没使用环形器时的信噪比值,在使用环形器后,在距离  $c \cdot \tau_0/2 + \Delta R$  内,系统的信噪比急剧下降,这是因为在这个距离内激光回波中会夹杂着环形器的“串音”干扰信号。信噪比的下降将会严重影响到系统的探测精度。在探测距离大于  $c \cdot \tau_0/2 + \Delta R$  时,由于取样点不在  $c \cdot \tau_0/2$  距离内,环形器中的“串音”消失,信噪比又恢复到原值,不会再出现文中所述的环形器串音影响回波的问题。实线的横坐标值表示不同取样距离  $\Delta R$  时,环形器的“串音”干扰所能够影响到的探测高度。如果将图 2 中的 PMT 换为光电探测器即可用于红外光的探测,分析方法类似,亦会产生上文所述的串扰问题。

### 3.2 探测精度分析

根据 Remsberg 和 Gordley<sup>[12]</sup> 的研究结论,对于  $\lambda_{\text{on}}$ 、 $\lambda_{\text{off}}$  光源单脉冲的浓度探测相对误差为

$$\frac{\Delta N}{N} = \frac{1}{2\Delta\tau} \left( \sum_{i,j} S_{i,j}^{-2} \right)^{1/2}, \quad (10)$$

式中  $\Delta\tau = N\Delta\delta \cdot \Delta R$ ,  $i$  为 on, off,  $j = 1, 2$ ,  $S_{i,j}$  表示  $\lambda_{\text{on}}$ 、 $\lambda_{\text{off}}$  光源分别在  $R_1$ 、 $R_2$  处的回波信噪比。易知,差分吸收截面越大,回波信噪比越高,气体浓度的探测误差越小<sup>[13]</sup>。根据(4)式,设  $\lambda_{\text{on}}$ 、 $\lambda_{\text{off}}$  光的脉冲累积数相等都为  $M$ ,并且忽略背景噪声  $N_B$ 。通过脉冲累积平均后,探测相对误差为<sup>[14]</sup>

$$\frac{\Delta N}{N} = \frac{1}{2M\Delta\tau} (S_{\text{on},1}^{-2} + S_{\text{on},2}^{-2} + S_{\text{off},1}^{-2} + S_{\text{off},2}^{-2})^{1/2}. \quad (11)$$

当  $R_1 < R_2 < c \cdot \tau_0/2$  时,如图 3 所示,“串音”将会影响到  $R_1$ 、 $R_2$  位置的信噪比计算。根据 3.1 节关于信噪比的分析,信噪比  $S_{\text{on},1}$ 、 $S_{\text{on},2}$ 、 $S_{\text{off},1}$ 、 $S_{\text{off},2}$  (下标 on, off 分别代表  $\lambda_{\text{on}}$ 、 $\lambda_{\text{off}}$  的回波光信噪比) 中噪声项都需要加入环形器串音  $N'_s$ 。把相关参数代入(1)、(2)式,可求得回波光子数  $N_{s,\text{on},1}$ 、 $N_{s,\text{on},2}$ 、 $N_{s,\text{off},1}$ 、 $N_{s,\text{off},2}$  的值,再代入(9)式求得信噪比,再将信噪比值代入(10)式,可求得相对误差值。

当  $R_1 < c \cdot \tau_0/2 < R_2$  时,如图 4 所示,此时的“串音”只会影响到  $R_1$  位置的信噪比计算,即计算  $S_{\text{on},1}$ 、 $S_{\text{off},1}$  时需要加入干扰项  $N'_s$ [对应(9)式],而不会影响到  $R_2$  位置的信噪比计算[对应(4)式]。当

$c \cdot \tau_0/2 < R_1 < R_2$  时,环形器“串音”不再对信噪比计算产生影响。根据以上的分析,经过计算可以得到 500 m 内的相对误差值,计算结果如图 6 所示。

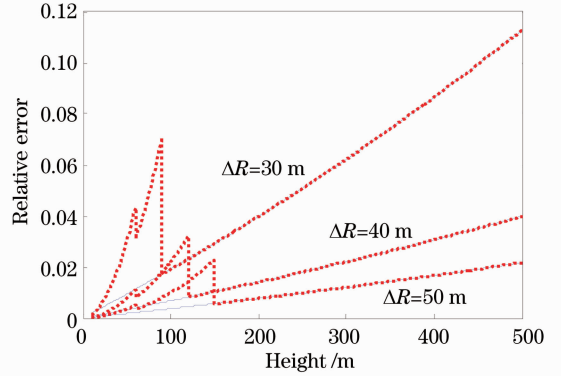


图 6 相对误差随高度变化曲线

Fig. 6 Variation of relative error with height

图 6 中,实线表示没使用环形器时,相对误差随探测高度变化的趋势;虚线表示使用环形器后,不同取样距离下相对误差随探测高度的变化。可以看出,取样距离越长探测相对误差就越小。对比没使用环形器时的相对误差值,在使用环形器后,在距离  $c \cdot \tau_0/2 + \Delta R$  内,探测的相对误差值会急剧加大。而且,在  $c \cdot \tau_0/2$  与  $c \cdot \tau_0/2 + \Delta R$  位置处能够看到两个明显的拐点,如 3.1 节所述,这是因为不同取样位置处,“串音”对信噪比的影响不同造成的。所以,探测系统中环形器的使用将会对低空大气的探测精度产生严重影响。

所以,在进行系统设计与指标确定时,若需要探测低空的大气浓度,就需要考虑由于环形器“串音”的引入给探测精度带来的影响。这将会影响城市中污染气体、森林中  $\text{CO}_2$  浓度的测定。

本文仅对近距离时的气体探测做出研究,在换用高能量激光器进行远距离探测后,由于激光脉冲是按一定频率(如 20 kHz)发出,下一个正在发射的激光脉冲产生的“串音”就会夹杂在上一个脉冲在 7.5 km 位置处返回的激光回波信号上,这就会造成 7.5 km 附近位置气体的探测结果出错,产生区域间断探测模糊问题。天基激光雷达或高空大气探测激光雷达都属于远距离探测的激光雷达<sup>[15-16]</sup>,所以,其在系统设计时需要考虑此方面的影响,本文不再做深入的研究。

另外,对环形器用于差分吸收系统进行了分析与仿真计算。对于相干多普勒激光雷达<sup>[1-6]</sup>,由于串音干扰远大于目标的激光回波信号,如果多普勒频移较小,串音与回波同时与本振信号相干后,在干

扰噪声带宽内就会使相干回波信号淹没于串音干扰中,并对最小测速精度这项指标产生影响。对于低空风场探测等测速指标要求高的情形,此种设计会有其相应的缺陷。而且,为了提高相干探测的测速精度,一般会选择长脉冲激光来降低线宽、提高相干效率,从而增加最小的有效探测距离,同时也会增大间断探测的模糊区域的距离。如果想降低最小有效探测距离,改用较短脉冲激光,相干后的干扰信号带宽将会变大,对通过频移反演出的最小测度精度将变低。所以,此部分设计存在矛盾性,具体的设计就需要根据实际的设计指标进行综合考虑。

对于相干差分吸收激光雷达,相干后的激光回波信号中也会夹杂环形器的串扰噪声,如果不进行信号处理的预先去除此部分的系统固定误差,而直接用此信号作为回波强度进行浓度反演,就会存在探测信噪比与精度严重下降的问题。由于系统参数已知,在干扰影响到的距离处,可对采集到的数据进行数据预处理,将回波直接减去串扰与本振相干后产生的固定强度误差,再进行数据反演以达到减小或消除干扰的目的,具体效果还需实验进行验证。

## 4 结 论

光环形器是一种常用的光学器件,被用于作为光路转换器、收发开关等,目前其光隔离度也已经很高。但是,在遇到大气探测等激光回波信号极其微弱的情况时,微弱的“串音”干扰也会对探测精度产生严重的影响。通过对应用环形器作为收发开关的全光纤差分吸收激光雷达系统的研究,结合模拟计算结果,证实了在探测近距离的气体浓度时,环形器的使用将对探测的信噪比与探测精度产生比较严重的影响。本文的分析方法与结论对相干激光雷达的系统设计也有重要的指导意义。

## 参 考 文 献

- 1 Feng Tianli, Guo Hongqi, Chen Yong, *et al.*. Experiment of all fiber Doppler lidar at 1.55  $\mu\text{m}$  [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(5): 844–847.  
冯天力, 郭弘其, 陈涌, 等. 1.55  $\mu\text{m}$  全光纤多普勒测风雷达系统与实验 [J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(5): 844–847.
- 2 Hong Guanglie, Zhang Yinchao, Hu Shunxing. Near infrared micro pulse lidar of profiling atmospheric  $\text{CO}_2$  [J]. *J Infrared Millim Waves*, 2004, 23(5): 384–388.  
洪光烈, 张寅超, 胡顺星. 探测低空大气  $\text{CO}_2$  浓度分布的近红外微脉冲激光雷达 [J]. *红外与毫米波学报*, 2004, 23(5): 384–388.

- 3 Wang Xitao, Liu Bingyi, Wu Songhua, *et al.*. 1.55  $\mu\text{m}$  all-fiber laser heterodyne detection and data analysis with high measurement accuracy of velocity [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48(6): 060301.  
王希涛, 刘秉义, 吴松华, 等. 高精度 1.55  $\mu\text{m}$  全光纤激光相干测速实验及数据分析 [J]. *激光与光电子学进展*, 2011, 48(6): 060301.
- 4 Fu Yang, Yan He, Jianhua Shang, *et al.*. Development of an all-fiber heterodyne lidar for range and velocity measurements [J]. *Chin Opt Lett*, 2010, 8(7): 713–716.
- 5 Yuan Liu, Jiqiao Liu, Weibiao Chen. Eye-safe, single-frequency pulsed all-fiber laser for Doppler wind lidar [J]. *Chin Opt Lett*, 2011, 9(9): 090604.
- 6 Ma Zongfeng, Zhang Chunxi, Ou Pan, *et al.*. Application of fiber interferometer in coherent Doppler lidar [J]. *Chin Opt Lett*, 2008, 6(4): 261–263.
- 7 Ceng Yong, Zhou Dingfu, Yang Zehou, *et al.*. Signal processing for  $\text{CO}_2$  differential absorption lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(24): 197–201.  
陈涌, 周鼎富, 杨泽后, 等.  $\text{CO}_2$  差分吸收激光雷达信号处理 [J]. *红外与激光工程*, 2006, 35(24): 197–201.
- 8 Ma Xin, Lin Hong, Ma Yingying, *et al.*. Atmospheric pressure broadening correction algorithm of differential absorption atmospheric  $\text{CO}_2$  lidar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(11): 1101003.  
马昕, 林宏, 马盈盈, 等. 差分吸收大气  $\text{CO}_2$  激光雷达的大气压力增宽修正算法 [J]. *光学学报*, 2012, 32(11): 1101003.
- 9 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*, 2008, 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*, 2008, 38(2): 300–303.
- 10 Sun Jingqun. *Laser Atmosphere Detect* [M]. Beijing: Science Press, 1986. 103.  
孙景群. *激光大气探测* [M]. 北京: 科学出版社, 1986. 103.
- 11 James D Spinhirne. Micro pulse lidar [J]. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 1993, 31(1): 48–55.
- 12 E Remsberg, L Gordley. Analysis of differential absorption lidar from the space shuttle [J]. *Appl Opt*, 1978, 17(4): 624–630.
- 13 Tao Xiaohong, Hu Yihua, Cai Xiaochun. Accuracy analysis of differential absorption lidar for detecting atmospheric  $\text{CO}_2$  [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2008, 3(2): 100–103.  
陶小红, 胡以华, 蔡晓春. 差分吸收激光雷达探测大气  $\text{CO}_2$  精度分析 [J]. *大气与环境学报*, 2008, 3(2): 100–103.
- 14 G Megie, R T Menzies. Complementarity of UV and IR differential absorption lidar for global measurements of atmospheric species [J]. *Appl Opt*, 1980, 19(7): 1173–1183.
- 15 Wu Dong, Zhang Xiaoxue, Yan Fengqi, *et al.*. Sea surface wind speed detection by using the data of CALIPSO lidar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(8): 0828002.  
吴东, 张小雪, 阎逢旗, 等. 基于星载激光雷达数据的海面风速探测 [J]. *光学学报*, 2012, 32(8): 0828002.
- 16 Fan Guangqiang, Liu Jianguo, Chen Zhenyi, *et al.*. A differential absorption lidar system for tropospheric ozone monitoring [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(11): 1113001.  
范广强, 刘建国, 陈臻懿, 等. 一套测量对流层臭氧的差分吸收激光雷达系统 [J]. *光学学报*, 2012, 39(11): 1113001.