

## APD 探测器的性能对激光雷达反演 CO<sub>2</sub> 浓度误差影响研究

左维康<sup>1,2</sup>, 朱亚丹<sup>1,2</sup>, 邱敏<sup>1</sup>, 刘继桥<sup>1</sup>, 陈卫标<sup>1</sup>

(1. 中国科学院上海光学精密机械研究所 中科院空间激光信息传输与探测技术重点实验室, 上海 201800;  
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 星载积分路径差分吸收(IPDA)激光雷达是全天时全球范围内探测 CO<sub>2</sub> 浓度的一种有效的方法, 而作为接收系统关键元件的光电探测器对激光雷达系统性能有着较大的影响。雪崩光电二极管(APD)有着较大的动态范围与高的响应度, 因此它在星载激光雷达中广泛应用。介绍了 IPDA 激光雷达和 APD 探测器的工作原理, 并根据实际工作条件, 测试了一款 APD 探测单元的响应度、动态范围、不同光功率下的信噪比等主要性能参数, 分析了这些性能参数对星载激光雷达 CO<sub>2</sub> 浓度的反演带来的影响。结果表明, 在 CO<sub>2</sub> 浓度为 400 ppm(1 ppm=10<sup>-6</sup>), 吸收波段信号的探测器输出电压在 280~980 mV 范围内时, APD 探测器本身的非线性和噪声造成的误差小于 0.8 ppm。

**关键词:** 误差分析; 积分路径差分吸收激光雷达; APD 探测器; 非线性; 信噪比

**中图分类号:** TN958.98 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0406002

## Influence of performances of APD detector on CO<sub>2</sub> concentration error retrieved by lidar measurement

Zuo Weikang<sup>1,2</sup>, Zhu Yadan<sup>1,2</sup>, Qiu Min<sup>1</sup>, Liu Jiqiao<sup>1</sup>, Chen Weibiao<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Space Laser Communication and Detection Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Science, Shanghai 201800, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Space-borne integrated path differential absorption (IPDA) lidar has been regarded as an efficient method to measure the concentration of the global atmospheric CO<sub>2</sub> column concentration all day long. As a key part of the lidar receiver, the performance of the photodetector has a significant influence in the overall lidar system. Avalanche photodiode (APD) is widely used in space-borne lidar because of its large dynamic range and high responsivity. The basic theories of the APD detector and the IPDA lidar were briefly introduced. And taking the actual working conditions of the space-borne IPDA lidar into account, the actual performances of an APD detector such as the detector's responsivity, dynamic range, linearity and the signal to noise ratio under different optical powers were tested. Then based on the

收稿日期: 2017-11-08; 修订日期: 2017-12-03

基金项目: 民用航天项目(1105231-CAO)

作者简介: 左维康(1991-), 男, 硕士生, 主要从事激光雷达技术方面的研究。Email: graham@hust.edu.cn

导师简介: 陈卫标(1969-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事激光雷达和空间激光器方面的研究。Email: wbchen@mail.shcnc.ac.cn

通讯作者: 刘继桥(1978-), 男, 研究员, 硕士生导师, 主要从事激光雷达技术方面的研究。Email: x\_qiao@siom.ac.cn

experiment result, the influence caused by the performances of the detector on concentration inversion was analyzed. The result shows that, when the CO<sub>2</sub> concentration is 400 ppm, and the on-line wavelength output voltage of the APD detector is between 280 mV and 980 mV, the CO<sub>2</sub> concentration error caused by the non-linearity and noise of the APD detector is less than 0.8 ppm.

**Key words:** error analysis; IPDA lidar; APD detector; non-linearity; signal to noise ratio

## 0 引言

CO<sub>2</sub> 是空气的重要成分,也是全球碳循环的关键一环,对于地球上的生物有着至关重要的作用。人类社会大量排放的 CO<sub>2</sub> 正在急剧影响着地球的气候。研究表明,温室气体,尤其是 CO<sub>2</sub> 是造成全球性气候变暖的主要因素。准确探测全球各地 CO<sub>2</sub> 的浓度有着深刻的意义。传统的观测手段,如地面观测站等,只能进行单点检测,无法在全球范围内进行探测,因此,具有很大的局限性。探测范围可以覆盖全球的卫星可以有效解决这个问题,而以自身发射激光代替太阳光的主动式星载激光雷达可以实现白天黑夜 24 h 工作,因此受到了越来越多的国家和组织的关注<sup>[1-2]</sup>。激光雷达主要由发射部分和接收部分组成<sup>[3]</sup>。接收系统对回波信号的探测精度是影响激光雷达探测精度的重要因素。接收系统主要包括大口径望远镜<sup>[4]</sup>和光电探测器,光电探测器作为雷达接收系统的重要部分,它的探测性能对激光雷达系统探测精度有着很大的影响。

为了提高 CO<sub>2</sub> 的探测精度,大气卫星的星载雷达可采用积分路径差分吸收(IPDA)激光雷达。差分吸收技术的主要原理是激光器发射两束激光,其中一束激光的波长靠近 CO<sub>2</sub> 吸收谱的吸收峰,被称为 on-line,这束激光被 CO<sub>2</sub> 强烈吸收;另一束激光的波长靠近 CO<sub>2</sub> 吸收谱的吸收谷,被称为 off-line,这束激光的作用是作为参考光<sup>[5]</sup>。激光器发射的这两束激光在地球表面被反射,反射光被激光雷达接收系统接收。由于 on-line 与 off-line 两束激光在大气传输过程中,大气的吸收系数不一样,通过对比两束激光的衰减程度,可以得到大气中 CO<sub>2</sub> 的含量,即 CO<sub>2</sub> 在大气中的分子柱浓度。大气中的水分子和气溶胶同样对 on-line 与 off-line 有差异性的吸收,通过适当地选择 on-line 与 off-line 的波长,可以将大

气中水蒸气和气溶胶等造成的影响降低至可以忽略的程度<sup>[6]</sup>。

激光在大气层传输过程中,由于大气吸收、散射等原因,星载激光雷达接收到的光信号相当微弱,因此检测灵敏度要求很高。相比较传统的光电二极管(PIN)探测器,雪崩二极管(APD)探测器有着灵敏度高、增益高等优点,适合微弱信号的检测<sup>[7]</sup>,因此,APD 探测模块在激光雷达中有着广泛的应用。在实际应用中,往往在 APD 后面接前置放大器以及主放大器,进一步提高增益。前置放大器的主要作用是将 APD 产生的电流信号转换为便于后续处理的电压信号,一般采用跨阻放大器。为放大微弱信号,常常在前置放大器后接一个主放大器。前置放大器和主放大器在放大信号的过程中也会放大噪声,同时也会引入噪声,并且与整个探测模块的线性区间的大小有很大的关系,因此,对整个探测模块而言,探测器的电路的设计非常重要。

文中介绍了星载 IPDA 激光雷达系统测量 CO<sub>2</sub> 柱线浓度的原理,针对 APD 探测器与后续电路组成的探测模块,实际测试其性能,并对与探测单元非线性响应及信噪比性能相关的 CO<sub>2</sub> 浓度反演误差进行了计算,为星载激光雷达反演数据误差源的研究提供了重要数据。

## 1 基本原理

激光雷达工作在卫星平台,测量全球 CO<sub>2</sub> 柱线浓度,基于激光差分吸收工作原理,系统发射两束波长相近的激光束,它们具有线宽窄、频率稳定等特点。这两束激光的波长分别在 CO<sub>2</sub> 吸收谱线的吸收峰与吸收谷底附近,同时还要尽可能减小水汽等其他气体带来的误差。文中激光雷达系统选取的工作波长为 on-line:  $6361.225 \text{ cm}^{-1}$  以及 off-line:  $6360.979 \text{ cm}^{-1}$ <sup>[6]</sup>。星载激光雷达的基本参数如表 1 所示。

表 1 星载激光雷达基本设计参数

Tab.1 Basic parameters of the space-borne lidar

Parameter	Value
Orbit height/km	~700
Working length/nm	1 572(on/off)
Emitting laser energy/mJ	75
Repetition frequency/Hz	50(double pulse)
Emitting laser pulse width/ns	~20
Linear width/MHz	~50
Frequency stability/MHz	0.3
Telescope aperture/m	Φ1
Detector	InGaAs APD
Bandwidth of detector/MHz	2
Data acquisition	50 Mbit/s, 14 bit

星载 CO<sub>2</sub> 激光雷达接收到的来自地表反射信号的功率可以表示为:

$$P_{on/off} = Q \frac{E_{on/off}}{t} \frac{A}{L^2} \times T_{opt} T_{atm} \exp(-2 \int_0^L n(r) \sigma_{on/off}(r) dr) \quad (1)$$

式中:  $P_{on/off}$  表示 on-line/off-line 回波信号的光功率;  $E_{on/off}$  表示激光雷达发射的 on-line/off-line 脉冲激光的能量;  $Q$  为硬目标的反射系数 ( $sr^{-1}$ );  $t$  为回波信号有效脉冲长度;  $A$  为望远镜接收面积;  $L$  为地表目标到激光雷达的距离;  $T_{opt}$  和  $T_{atm}$  分别为系统光学效率和大气传输效率(双程效率, 不包括 CO<sub>2</sub> 吸收气体);  $n(r)$  为距离为  $r$  处的 CO<sub>2</sub> 分子数浓度;  $\sigma(r)$  为距离  $r$  处对应的 CO<sub>2</sub> 吸收截面( $cm^2/molecule$ ).

定义  $\Delta OD$  为单位面积上, on-line 与 off-line 由于 CO<sub>2</sub> 的吸收产生的差分光学厚度, 即:

$$\Delta OD = \int_0^{P_{ground}} (\sigma_{on} - \sigma_{off}) n(r) dr \quad (2)$$

由流体静力学方程和理想气体状态方程, 可得:

$$\Delta OD = \int_0^{P_{ground}} X_{CO_2}(p) \times \frac{\sigma_{on}(p) - \sigma_{off}(p)}{\left(1 + \frac{m_{H_2O}}{m_{dryair}} X_{H_2O}\right) m_{dryair} g} dp \quad (3)$$

式中:  $X_{CO_2}$  表示在干燥空气中 CO<sub>2</sub> 混合比;  $m_{H_2O}$  与  $m_{dryair}$  分别表示水分子的质量与干燥的空气分子的平均质量;  $X_{H_2O}$  表示水分子在空气中所占的比值;  $P_{ground}$  为地面气压;  $g$  为重力加速度。

定义权重函数<sup>[6]</sup>:

$$WF = \frac{\sigma_{on}(p) - \sigma_{off}(p)}{\left(1 + \frac{m_{H_2O}}{m_{dryair}} X_{H_2O}\right) m_{dryair} g} \quad (4)$$

由公式(4)可以得到大气层顶到地表间整个积分路径 CO<sub>2</sub> 平均混合比(柱线浓度)  $X_{CO_2}$ :

$$X_{CO_2} = \frac{\Delta OD}{2 \int WF(p) dp} = \frac{1}{2 \int WF(p) dp} \ln \frac{E_{on}}{E_{off}} \frac{P_{off}}{P_{on}} \quad (5)$$

APD 探测器是利用 PN 结在高反向电压的工作条件下产生的雪崩效应来放大光生电流的半导体器件, 它本身就具有电流增益, 具有响应速度快、响应度高等特点, 是一种应用在可见光和近红外光等波段内微弱光信号探测的重要光电探测器。根据激光雷达的工作波长(1 572 nm)以及实际工作条件, 选择了 Laser Components 公司的 APD 探测器(型号 IAG350H1C), 该探测器响应为 10 MV/W, 带宽为 3 MHz, 等效噪声功率为 64 fW/(Hz)<sup>1/2</sup>。

## 2 探测器电路设计及性能测试

由于 APD 探测器的实际响应率不能满足项目的要求, 因此, 需要在 APD 探测器后面加上一级放大电路, 以提高其响应率。放大电路的设计准则是保证输入-输出电压之间的线性关系, 以及减少自身引入的噪声。放大电路的原理图如图 1 所示。

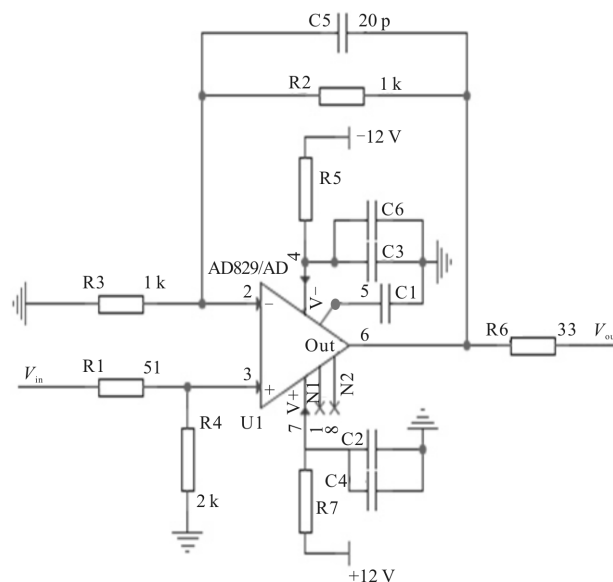


图 1 探测模块放大级电路图

Fig.1 Schematic of amplifier circuit of the detection module

为了得到不同回波光功率下探测器的实际工作性能, 考虑到实际工作条件, 文中将 1 572 nm 的连续激光经声光调制器调制成重复频率为 50 Hz, 脉宽为 200 ns 的脉冲光, 经过光隔离器、数字可调式光衰减

器以及衰减片,入射到探测器中,然后用数据采集卡采集探测器输出信号,经过数据处理,得到探测器的实际性能。探测器响应信号的波形见图 2。可调光衰减器采用中国电子科技集团公司第 41 研究所的 AV6381B 可编程光衰减器,通过测得未经衰减的激光峰值功率,再标定不同衰减倍率示数下的实际衰减倍数,可以得到入射到探测器的实际激光峰值功率。

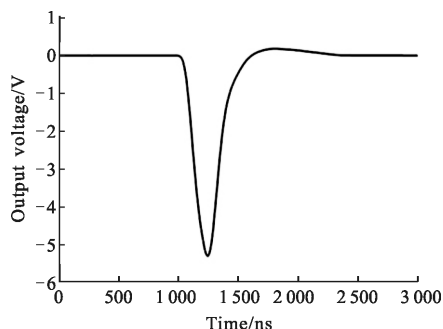


图 2 数据采集卡采集到的 APD 探测器响应信号

Fig.2 Response signal of the APD detector captured by data collection card

测量的探测器的输出电压与入射光峰值功率之间的关系如图 3 所示,探测器输出信噪比与入射光功率之间的关系如图 4 所示。

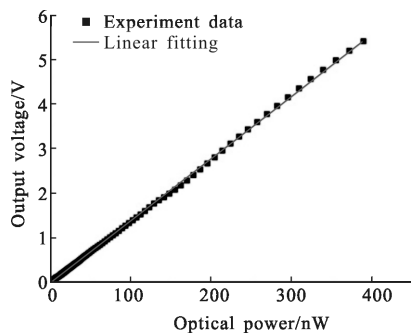


图 3 探测器的入射光功率-输出电压关系

Fig.3 Output voltage of the detector changed with input optical power

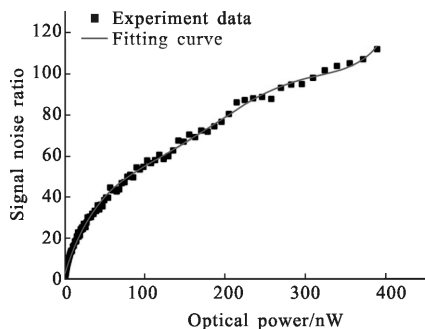


图 4 探测器入射光功率-输出信噪比关系

Fig.4 Output SNR changed with input optical power

为了不引入较大的电子电路噪声,选取了 AD829 低噪声高速放大器。通过 R1,R4 串联分压,将 APD 探测器输出信号引入放大电路,电路放大倍率为 2 倍,3 dB 带宽为 5 MHz。为了进一步降低噪声,满足通道探测带宽 2MHz 的要求,在探测器输出后端接了 2MHz 的低通滤波电路。

针对图 3 测量的探测器响应,经过线性拟合,得到线性拟合方程为  $y=0.01392x-0.01561$ ,其中,y 表示探测器输出电压,x 表示输入到探测器的光功率。线性拟合的校正决定系数(adjusted R square)为 0.99968。

测试结果表明:探测器线性区范围是从 0.00335 V (SNR=1)到 5.4 V (输出饱和),动态范围是 32.07 dB,APD 探测模块的响应度为 0.01392 V/nW。

### 3 探测器带来的误差分析

在利用星载 IPDA 激光雷达反演大气中 CO<sub>2</sub> 柱线浓度的时候,由于激光器频率不稳定、功率不稳定等因素,使得星载 IPDA 激光雷达反演得到的 CO<sub>2</sub> 柱线浓度和实际柱线浓度有所偏差。IPDA 激光雷达的误差主要可分为两类:系统误差和随机误差。此节主要研究由于探测器的非线性带来的系统误差以及探测器输出信号噪声带来的随机误差。

#### 3.1 非线性度对反演 XCO<sub>2</sub> 的误差分析

在反演 X<sub>CO<sub>2</sub></sub> 的过程中,认为 off-line 与 on-line 的电压比值即为回波信号的功率比。然而,探测器存在着一定的非线性效应。因此,探测器的非线性度会引起系统误差。此节利用前文所测的 APD 探测器非线性响应曲线和 CO<sub>2</sub> 浓度反演公式(5)来计算在一定地表反射率范围内,针对多脉冲反演时激光器能量抖动在±5%,探测器非线性响应给 CO<sub>2</sub> 浓度反演结果带来的影响。

由公式(5)可知,在反演大气 CO<sub>2</sub> 柱线浓度 X<sub>CO<sub>2</sub></sub> 时,需要计算大气权重函数在整个大气层的积分,它与大气温度和压力密切相关,最终计算柱线浓度 X<sub>CO<sub>2</sub></sub> 需要获得不同高度大气湿度分布。以 2016 年 6 月 21 日上海地区探空气球获得的大气湿度、温度和压力的分布数据为例<sup>[8]</sup>,如图 5~7 所示。图 6 中 1 atm=1.01×10<sup>5</sup> Pa。

假设大气中 CO<sub>2</sub> 的柱线浓度为 400 ppm(1 ppm=10<sup>-6</sup>),则由公式(5)可知,在一定天气条件下,  $\frac{E_{on}}{E_{off}}$

$\frac{P_{off}}{P_{on}}$  为定值,由于发射的 E<sub>on</sub> 与 E<sub>off</sub> 能量近似相等,则

$$\frac{P_{off}}{P_{on}} = 4.3866 \quad (6)$$

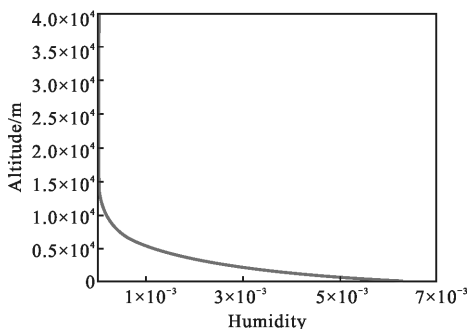


图 5 大气层湿度随高度变化关系

Fig.5 Humidity of the atmosphere layer changed with altitude

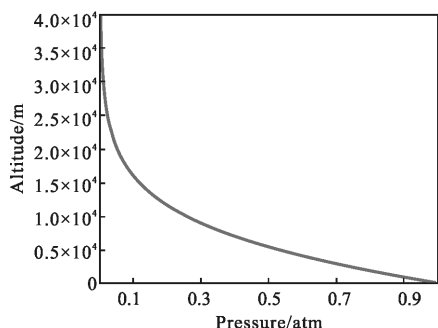


图 6 大气层压强随高度变化关系

Fig.6 Pressure of the atmosphere layer changed with altitude

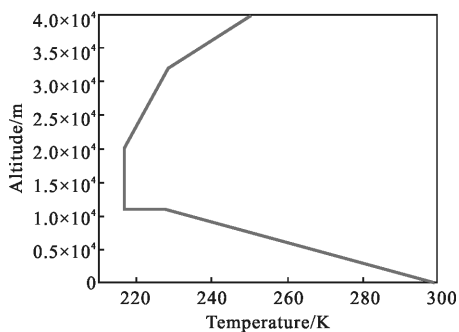


图 7 大气层温度与随高度变化关系

Fig.7 Temperature of the atmosphere layer changed with altitude

在实际应用时,使用探测器的响应信号代替入射信号,即:

$$X_{CO_2}' = \frac{\Delta OD}{2 \int WF(p)dp} = \frac{1}{2 \int WF(p)dp} \ln \frac{E_{on}}{E_{off}} \frac{V_{off}}{V_{on}} \quad (7)$$

$X_{CO_2}'$  是利用探测器输出电压反演得到的  $CO_2$  浓度,  $V_{off}$  与  $V_{on}$  分别表示 off-line 与 on-line 回波信号的输出电压。探测器输出电压与输入光功率之间不是完全线性关系,  $\frac{V_{off}}{V_{on}}$  与  $\frac{P_{off}}{P_{on}}$  不一致,导致反演结果

存在偏差,这个误差被称为非线性误差。

文中所用的星载 IPDA 激光雷达探测大气中  $CO_2$  柱线浓度是通过发射一组脉冲(包括 350 个 on-line 脉冲与 350 个 off-line 脉冲),由于激光功率不稳定等因素,激光发射端发射的光功率有 5% 的抖动。由探测器输出的 on-line 回波信号电压  $V_{on}$  利用图 3 可得到 on-line 回波信号光功率  $P_{on}$ ,又由公式(6)得到  $P_{off}$ ,利用图 3 得到  $V_{off}$ ,带入公式(7),可得到一对脉冲信号反演得到的  $CO_2$  柱线浓度。在  $V_{on} \pm 5\%$  的范围内随机取 350 个点,得到 350 个反演的  $X_{CO_2}'$ 。这 350 个  $X_{CO_2}'$  的平均值与实际值  $X_{CO_2}$  之差即为探测器非线性引入的系统误差。

On-line 回波信号电压幅值在 280~980 mV 范围内时,探测器非线性引起的  $CO_2$  柱线浓度误差分布如图 8 所示。此范围内误差均小于 0.7 ppm,最小约 0.1 ppm。

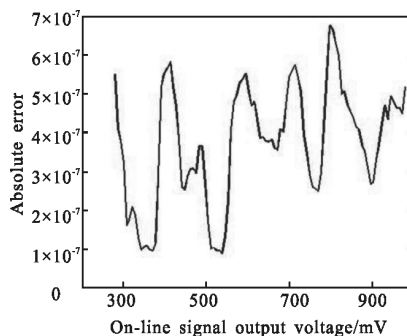


图 8 On-line 回波响应电压在 280~980 mV 范围时,APD 探测器非线性引起的绝对系统误差

Fig.8 Absolute system error caused by the non-linearity of the APD detector between 280~980mV(on-line response voltage)

### 3.2 探测器带来的随机误差分析

随机误差(Random Error, RE) 主要由噪声产生,并与回波信号功率的大小有关。光电探测器的噪声主要来源是散粒噪声、热噪声、1/f 噪声、产生复合噪声等<sup>[9]</sup>。对于 APD 而言,它的输出信噪比为<sup>[10]</sup>:

$$SNR = \frac{M\alpha P}{\sqrt{2eM^2\Delta f(\alpha P + I_d) + \frac{4k_B T_{dw}\Delta f}{R_L} + I_{AMP}^2}} \quad (8)$$

式中: $M$  为 APD 内部增益因子; $\alpha$  为未被增益的探测器的响应; $e$  为单电子电量; $P$  为入射光功率; $R_L$  为反馈电阻; $\Delta f$  为电子带宽; $I_d$  为暗电流; $k_B$  为玻耳兹曼常数; $T_{dw}$  为 APD 内部工作温度; $I_{AMP}$  是放大电

路引入的电流。

相对随机误差 RRE 可以表示为<sup>[9]</sup>:

$$RRE = \frac{\Delta(\Delta OD)}{\Delta OD} = \frac{\Delta X_{CO_2}}{X_{CO_2}} = \frac{1}{2\Delta OD \sqrt{N} SNR} \quad (9)$$

式中:  $N$  是反演  $CO_2$  柱线浓度需要的平均脉冲次数, 在重复频率 50 Hz 以及星载测量水平分辨率 50 km 时, 取脉冲次数  $N=350$ 。

由于探测器的各个噪声不相关, 因此, 可以得到:

$$\frac{1}{SNR} = \sqrt{\left(\frac{1}{SNR_{on}}\right)^2 + \left(\frac{1}{SNR_{off}}\right)^2} \quad (10)$$

式中:  $SNR_{on}$  与  $SNR_{off}$  分别表示 on-line 回波信号与 off-line 回波信号的信噪比。

在计算探测器总的信噪比时, 由  $V_{on}$  和图 3 可得到  $P_{on}$ 。由  $P_{on}$  和公式(6)可得到  $P_{off}$ 。由  $P_{on}$ 、 $P_{off}$  和图 4 可分别得到  $SNR_{on}$  与  $SNR_{off}$ 。联立公式(9)和公式(10)可得 on-line 信号响应电压在 280~980 mV 范围内探测器噪声引起的随机误差, 如图 9 所示。

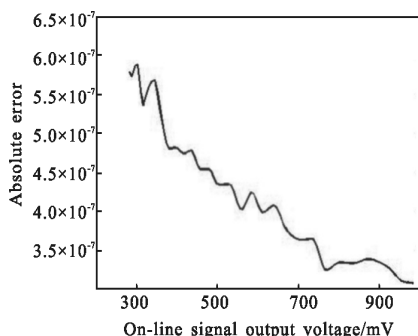


图 9 On-line 信号响应电压在 280~980 mV 范围内, APD 探测器噪声引起的绝对随机误差

Fig.9 Absolute random error caused by the noise of the APD detector between 280~980 mV (on-line response voltage)

由图 9 可知, 探测器 on-line 信号响应电压在 280~980 mV 之间时, 由探测器噪声引起的随机误差小于 0.6 ppm。

### 3.3 探测器综合误差分析

由于探测器造成的随机误差和系统误差之间是独立的, 因此, 可以得到由探测器引起的综合误差为两者平方之和的均方根。在探测器响应电压在 280~980 mV 范围内时, 由于探测器响应的非线性以及噪声引入的总误差, 如图 10 所示, 结果表明 on-line 信号响应电压在 280~980 mV 范围内, 探测器造成的总误差小于 0.8 ppm。

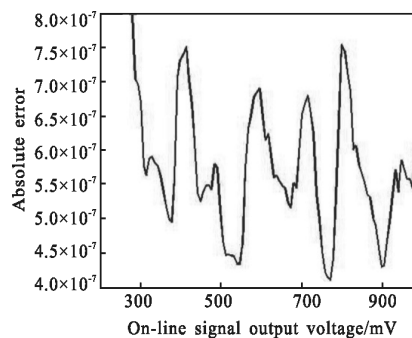


图 10 On-line 回波响应电压在 280~980 mV 范围内的综合误差  
Fig.10 Total error between 280~980 mV (on-line response voltage)

## 4 结论

文中介绍了积分路径差分吸收激光雷达的基本原理, 分析了  $CO_2$  浓度反演方法, 建立了反演大气中  $CO_2$  柱线浓度的模型。同时, 对于激光雷达所使用的 APD 探测器进行了分析, 并且根据激光雷达接收到的实际信号特性, 测试 APD 探测器对于 50 Hz 重复频率, 脉冲宽度 200 ns 的 1572 nm 信号光的响应, 分析了 APD 探测器的主要性能指标, 包括拟合直线的决定系数、不同峰值功率下的信噪比等。测试结果表明, 探测器输入输出之间的拟合直线决定系数达到了 99.968%, 探测器响应度为 13.92 mV/nW。进而, 文中分析了探测器非线性响应导致的系统误差以及探测器输出噪声引起的随机误差。分析结果表明, 在 APD 输出 on-line 回波信号在 280~980 mV 范围内时, 由于探测器自身性能造成的综合误差在 0.8 ppm 以内, 为激光雷达高精度和高灵敏度探测器的性能评估提供了重要参考。

## 参考文献:

- [1] Qu Yi. Technical status and development tendency of atmosphere optical remote and monitoring [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(6): 834-840. (in Chinese)  
曲艺. 大气光学遥感监测技术现状与发展趋势[J]. *中国光学*, 2013, 6(6): 834-840.
- [2] Li Yi, Wu Qingwen, Chen Liheng, et al. Thermal control system of carbon dioxide detection instrument[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(4): 1053-1061. (in Chinese)  
李毅, 吴清文, 陈立恒, 等. 二氧化碳探测仪的热控系统[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(4): 1053-1061.
- [3] Qu Hengkuo, Zhang Qingyuan, Ruan Youtian. Laser radar

- based on scanning image tracking [J]. *Chinese Optic*, 2012, 5(3): 242–247. (in Chinese)
- 屈恒阔, 张清源, 阮友田. 扫描成像跟踪激光雷达[J]. 中国光学, 2012, 5(3): 242–247.
- [4] Sun Hang, Zhang Haibo, Cao Lihua, et al. Error compensation for primary mirror shaking of large aperture optical detection equipment [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(1): 85–91. (in Chinese)
- 孙航, 张海波, 曹立华, 等. 大口径光电探测设备主镜晃动的误差补偿 [J]. 光学精密工程, 2014, 22(1): 85–91.
- [5] Shi Chenglong, Liu Jiqiao, Bi Decang, et al. Errors analysis of dioxide carbon concentrations measurement by airborne lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(5): 0530001. (in Chinese)
- 史成龙, 刘继桥, 毕德仓, 等. 机载激光雷达测量二氧化碳浓度误差分析 [J]. 红外与激光工程, 2016, 45(5): 0530001.
- [6] Xie Yangyi, Liu Jiqiao, Jiang Jiabin, et al. Wavelengths optimization to decrease error for a space-borne lidar measuring CO<sub>2</sub> concentration [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(1): 88–93. (in Chinese)
- 谢杨易, 刘继桥, 姜佳欣, 等. 使 CO<sub>2</sub> 浓度测量误差减小的星载激光雷达波长优化 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(1): 88–93.
- [7] Xiong Qian, Lan Tian, Zhu Qi, et al. Design and implementation of indoor visible light communication avalanche photodiode detecting circuit [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(2): 731–735. (in Chinese)
- 熊倩, 蓝天, 朱祺, 等. 室内可见光通信 APD 探测电路的设计与实现[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(2): 731–735.
- [8] University of Wyoming. Atmospheric Surroundings [EB/OL]. [2016–06–21]. <http://weather.uwyo.edu/upperair/surrounding.html>.
- [9] Lisak D, Rusciano G, Sasso A. An accurate comparison-line of line-shape models on-line H<sub>2</sub>O line in the spectral region-line around 3 m [J]. *Journal of Molecular Spectroscopy*, 2004, 227: 162–171.
- [10] Gasmi K. Fast and low noise optical receiver using Si APD for cloud-aerosol LIDAR [EB/OL]. [2017–09–05]. <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/on05/09/2017>.