

文章编号: 1672-8785(2018)02-0014-07

大气压力探测用激光雷达的对称性分析

洪光烈^{1,2} 王 钦³ 孔 伟^{1,2} 吴金才^{1,2}

(1. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;

2. 中国科学院空间主动光电技术重点实验室, 上海 200083;

3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 为了实现世界气象组织对大气压力廓线和地表压力特别高的探测精度, 需要消除湍流对距离分辨差分吸收激光雷达和路径积分差分吸收激光雷达的干扰。探测/参考双波束被转换成左旋圆偏振光和右旋圆偏振光后被同时发射出去, 经大气后的回波再被 1/4 波片、偏振分束片以及两个 F-P 标准具重新分离而被检测到。差分吸收激光雷达的除法、对数和积分运算由模拟电路进行对称的实时处理, 这样有利于减小由双通道差异化带来的误差。差分吸收激光雷达的探测波束脉冲与参考波束脉冲同路径传输、同时发射、同时接收, 可抵消大气随机运动等因素对系统的共模干扰。模拟研究结果表明, 差分吸收激光雷达采取严格的对称性安排, 是一个可提高系统探测精度的十分有益的举措。

关键词: 激光雷达; 距离分辨差分吸收激光雷达; 路径积分差分吸收激光雷达; 对称性

中图分类号: TN959.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2018.02.003

Analysis of Symmetry of Lidar for Atmospheric Pressure Detection

HONG Guang-lie^{1,2}, WANG Qin³, KONG Wei^{1,2}, WU Jin-cai^{1,2}

(1. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. Key Laboratory of Space Active Opto-Electronics Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: To realize the particularly high detection accuracy proposed by World Meteorological Organization (WMO) for atmospheric pressure profile and surface pressure, the interference of turbulence with range-resolved differential absorption lidars and integrated path differential absorption lidars should be removed. A detection beam and a reference beam are converted into a left-handed rotation polarization light beam and a right-handed rotation polarization light beam respectively. Then, both beams are emitted synchronously. The echoes transmitted by atmosphere are separated again by a 1/4 wave plate, a polarized light splitter and two F-P etalons and then are detected. To reduce the error due to the difference between two channels, the division, log-

收稿日期: 2017-11-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(61775227); 中国科学院空间主动光电技术重点实验室基金项目(CXJJ17S024; CXJJ17S026)

作者简介: 洪光烈(1966-), 男, 安徽庐江人, 研究员, 博士, 主要从事激光雷达与遥感方面的研究。

E-mail: glhong@mail.sitp.ac.cn

arithm and integral operation are processed symmetrically by an analog circuit in real time. The same path transmission, synchronous emission and synchronous receiving of both the detection beam pulse of a differential absorption lidar and the reference beam pulse can cancel the common-mode interference of the factors such as atmospheric random motion with the system. The simulation research results show that the symmetric arrangement of a differential absorption lidar is a most beneficial measure for improving its detection accuracy.

Key words: lidar; range-resolved differential absorption lidar; integrated path differential absorption lidar; symmetry

0 引言

早在 20 世纪 70 年代, Murray E R 就提出了用差分吸收激光雷达探测大气痕迹气体成分的思想^[1], 但是此后差分吸收激光雷达的研究进展实际上并不是很快。直至近二十年, 差分吸收激光雷达才终于在近紫外和蓝光波段实现了对大气中臭氧、二氧化硫、二氧化氮等痕迹气体浓度的探测^[2-3], 并在近红外波段实现了对大气中水汽浓度的探测^[4]。上述四种成分是差分吸收激光雷达成功探测的典型范例。近年来, 人们在用 1.6 μm 波段和 2.0 μm 波段差分吸收激光雷达探测对流层中下段的大气二氧化碳浓度廓线以及大气二氧化碳柱浓度方面也取得了可喜的进展^[5]。但是个别大气参数的探测工作对于差分吸收激光雷达的精度要求非常高。如世界气象组织要求距离分辨差分吸收激光雷达(氧气的 A 带吸收)对大气压力廓线的探测精度达到 0.3%^[6], 路径积分差分吸收激光雷达对地表大气压力的探测精度达到 0.1%, 上述任务是当代差分吸收激光雷达所面临的最主要挑战。虽然 20 世纪 80 年代就有美国科学家开始研究基于差分吸收激光雷达的大气压力探测, 但是至今全球还没有一个成功的系统可以实现常态化运行^[7]。除了激光器的线宽、波长稳定性和光谱纯度之外, 人们还对差分吸收激光雷达的双波长差异性以及双波长脉冲发射的时间间隔提出了更高的要求。目前正在运行的水汽探测用差分吸收激光雷达的重复频率为 20 Hz^[4], 探测脉冲和参考脉冲的时间间隔为 50 ms。这对于用差分吸收激光雷达探测大气压力来说是难以接受的。目前已

实现业务化工作的臭氧探测用紫外差分吸收激光雷达的探测波长与参考波长之间相差 12 nm^[2], 这对于用差分吸收激光雷达探测大气压力来说同样也是无法容忍的。差分吸收激光雷达的误差主要来源于三个方面: 第一, 回波信号相对于背景光、暗电流、热电阻等散粒噪声的信噪比。这是激光雷达长期受到关注的共性问题, 专家们对此研究得也比较多^[8]。第二, 由探测/参考双波长差值引起的后向散射系数—消光系数差, 如 Paolo Francesco Ambri-co 等人所做的研究^[9]。第三, 在系统探测/参考双脉冲的时间间隔内由大气湍流等随机变化引起的回波信号抖动。制定关于对称性的研究措施和方案并克服大气湍流等扰动, 对于消除用差分吸收激光雷达探测大气压力廓线和地表压力时所受的影响具有十分重要的意义。

1 差分吸收激光雷达的光学对称性

距离分辨差分吸收激光雷达针对压力廓线的探测激光波长 online 与参考激光波长 offline 的差值不宜超过一定的范围^[9], 而且大气并非凝固不变, 因此探测/参考双波束发射时间的间隔应在 200 μs 以内^[6]。设 $S_{on}(z)$ 和 $S_{off}(z)$ 分别为探测到的 online 和 offline 光回波功率, 则距离分辨差分吸收激光雷达方程如下:

$$S_{on}(z) = \frac{E_{on}\eta_{Ac}}{2z^2}\eta_r\beta(z) \times \exp\left\{-2\int_0^z[\alpha(r) + K_{on}(r)]dr\right\} \quad (1)$$

$$S_{off}(z) = \frac{E_{off}\eta_{Ac}}{2z^2}\eta_r\beta(z) \times \exp\left\{-2\int_0^z[\alpha(r) + K_{off}(r)]dr\right\} \quad (2)$$

式中, η_t 为发射光学效率; η_r 为接收光学效率; r 为积分函数的高度参数; A 为望远镜的有效接收面积; $\alpha(r)$ 为气溶胶及目标气体(用差分吸收激光雷达探测大气压力时的目标气体是氧气)以外分子在高度 r 处的消光系数; $K_{on}(r)$ 和 $K_{off}(r)$ 为对应的目标气体(氧气)在高度 r 处的吸收系数($K_{off}(r)$ 相对较小); c 为光速; z 为被探测处的相应高度; 0.0 点是激光雷达望远镜的高度; 当回波来自大气后向散射时, $\beta(z)$ 表示大气后向散射系数。若作理想的简化假设, 则对于双波长来说, 除 $K(z)$ 之外的所有参数的时间变化相等。以氧气为目标气体模型, 根据激光雷达方程可得到差分吸收系数:

$$K_{on}(z) - K_{off}(z) = \frac{1}{2} \frac{d}{dz} \left[\ln \left(\frac{E_{on} S_{off}(z)}{E_{off} S_{on}(z)} \right) \right] \quad (3)$$

双波长吸收系数差 $[K_{on}(z) - K_{off}(z)]$ 是垂直高度 z 处大气压力的函数^[10]:

$$f(T) = [K_{on}(z) - K_{off}(z)] \quad (4)$$

作为一种随机介质, 大气介质的消光系数并非“凝固”不变, 因此非常难以对大气的这种变化过程进行描述和表达。激光束在不同时间穿过相同路径或者在相同时间穿过不同路径时, 所受到的大气干扰(比如大气湍流)都是不确定的。因此, 大气气溶胶与气体分子的消光系数 $\alpha(r)$ 和后向散射系数 $\beta(z)$ 会随时间涨落, 从而引起回波信号的涨落。如果两种光束的波长相近且沿同一光路同时发射, 经大气返回后同时接收, 那么它们所经历的难以计算的其他大气效应(大气湍流、大气消光系数或折射率等参数随时间的随机抖动)过程也就相同。这可以通过差动将其抵消掉, 而只凸显由目标参数引起的双波束光谱吸收的差别。

当路径积分差分吸收激光雷达在轨运行时, 随着卫星的移动, 光束照射在地球表面上的足印千变万化, 可以是草原、沙地、海面等等。由于它们的反射系数不同, 回波光信号会变化不定。此时把对称的思想更严格地应用于

激光探测过程, 即以相同路径同时发射探测光束和参考光束, 使其照射到地表/云顶的光斑相互重合。

$$\begin{aligned} S_{on}(R) &= \frac{E_{on} A_R}{\tau R^2} \eta_t \eta_r \\ &\times \exp \left\{ -2 \int_0^R [\alpha(r) + K_{on}(r)] dr \right\} (r_{sur} / \Omega_{sur}) \quad (5) \\ S_{off}(R) &= \frac{E_{off} A_R}{\tau R^2} \eta_t \eta_r \\ &\times \exp \left\{ -2 \int_0^R [\alpha(r) + K_{off}(r)] dr \right\} (r_{sur} / \Omega_{sur}) \quad (6) \end{aligned}$$

当回波来自于硬目标反射时, r_{sur} / Ω_{sur} 为地面目标的朗伯散射系数(sr^{-1}), τ 为发射光脉冲的宽度, R 为地面与发射机的距离。

对于探测波长的种子激光、脉冲功率激光器和放大器乃至控制单元来说, 其结构及性能与参考波长完全一致。当参考波长激光束进入非零级 1/2 波片后, 将波片旋转至恰当角度, 使入射光的 s 偏振变成 p 偏振, 且与探测波长激光束的 s 偏振方向垂直。它们同时分别从两个端面进入基于格兰一付科偏振棱镜(分界面是空气隙, 不用胶合)的偏振合束器(Polarization Beam Combiner, PBC), 经偏振合束后再一起通过非零级 1/4 波片; 两者分别被转变成左旋圆偏振光和右旋圆偏振光, 并始终重合在一起, 如图 1 所示。由于在大气中行进的路径相同, 大气对左旋圆偏振光和右旋圆偏振光的后向散射系数和消光系数相同, 双波束在地球表面上的足印是重合的; 云顶和地球表面对左旋圆偏振光和右旋圆偏振光的反射率也是相同的。

回波光被望远镜接收后, 首先由窄带滤光片(半峰值宽度位于激光波长的 0.2%~0.3% 之间, 略大于双波长差值的两倍)把背景光滤掉。透过窄带滤光片的回波光仍然是圆偏振光, 经 1/4 波片后又变成线偏振光。接着偏振分束器(Polarization Beam Splitter, PBS)将它分成 s 分量线偏振光(被 PBS 全部反射)和 p 分量线偏振光(可以全部透过 PBS)。

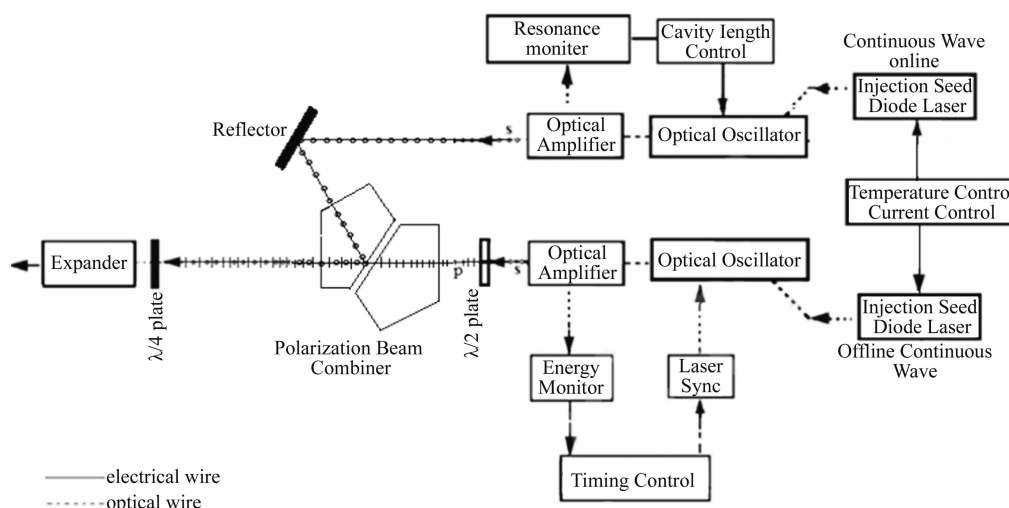


图 1 差分吸收激光雷达发射机的示意图

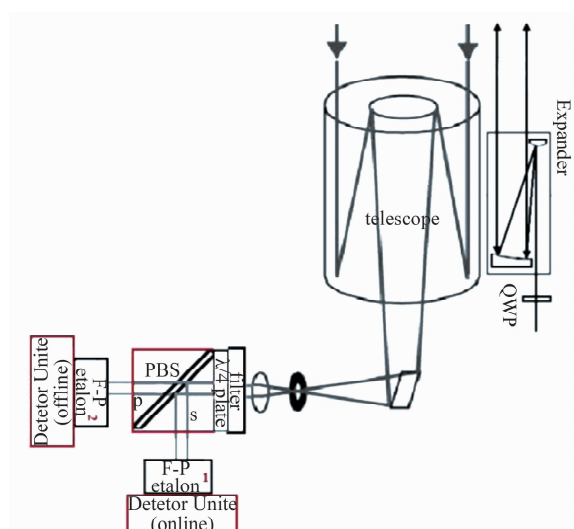


图 2 差分吸收激光雷达接收机的示意图(1/4波片)

s 偏振光的绝大部分波长与 F-P1 标准具的中心波长 offline (参考波长) 相同, 即可透过 F-P1 标准具被探测器检测到; 只有极少部分波长与 F-P1 标准具的中心波长 offline 不同, 这部分光会被 F-P1 标准具完全反射。

来自滤光片的 p 偏振光透过 PBS 分束片进入 online F-P2 标准具。其绝大部分波长等于 F-P2 标准具的中心波长 online (探测波长), 即可透过 F-P2 标准具被探测器检测到; 若其极少数波长不等于 F-P2 标准具的中心波长 online, 这部分光则会被 F-P2 标准具完全反射。

通过采取上述措施, 两种光束同时间同路径

发射、同时间同路径接收, 可将大气介质随机扰动(比如湍流)的共模干扰抵消掉, 因而只有双波束大气透过率的对数(光学厚度)差被输出。

2 差分吸收激光雷达的电子学对称性

2.1 基于距离分辨差分吸收激光雷达的大气压力分布廓线运算

在用距离分辨差分吸收激光雷达探测压力廓线分布时, 通过将式(1)和式(2)相除并取对数就可得到式(3)。K(z)随高度 z 变化的一系列数值可以用来迭代反演大气压力分布廓线:

$$f(p) = K(z) = K_{on}(z) - K_{off}(z) \\ = \frac{1}{2} \frac{d}{dz} \left[\ln \left(\frac{E_{on} S_{off}(z)}{E_{off} S_{on}(z)} \right) \right] \quad (7)$$

为了提高探测精度, 信号处理时也要强化对称性, 以抑制共模噪声。图 3 中, 雪崩光电二极管(Avalanche Photodiode, APD)用于转换输出 $S_{on}(z)$ 和 $S_{off}(z)$ 的光电流, 此光电流中已扣除另一个相同的匹配 APD 的基线电流; INA168 电流放大器也是一种差分放大器, 用于放大前面两个已扣除基线值的光电流; LOG104 精密对数放大器可以利用两个光电流的比值(I_1/I_2)实现对数运算并输出电压信号, 其中晶体管 Q_1 和晶体管 Q_2 的特性完全相同, 以消除晶体管的反向饱和电流 I_s 对运算关系的影响^[12], 如图 3 所示。基线电流 I_B 表示没有回

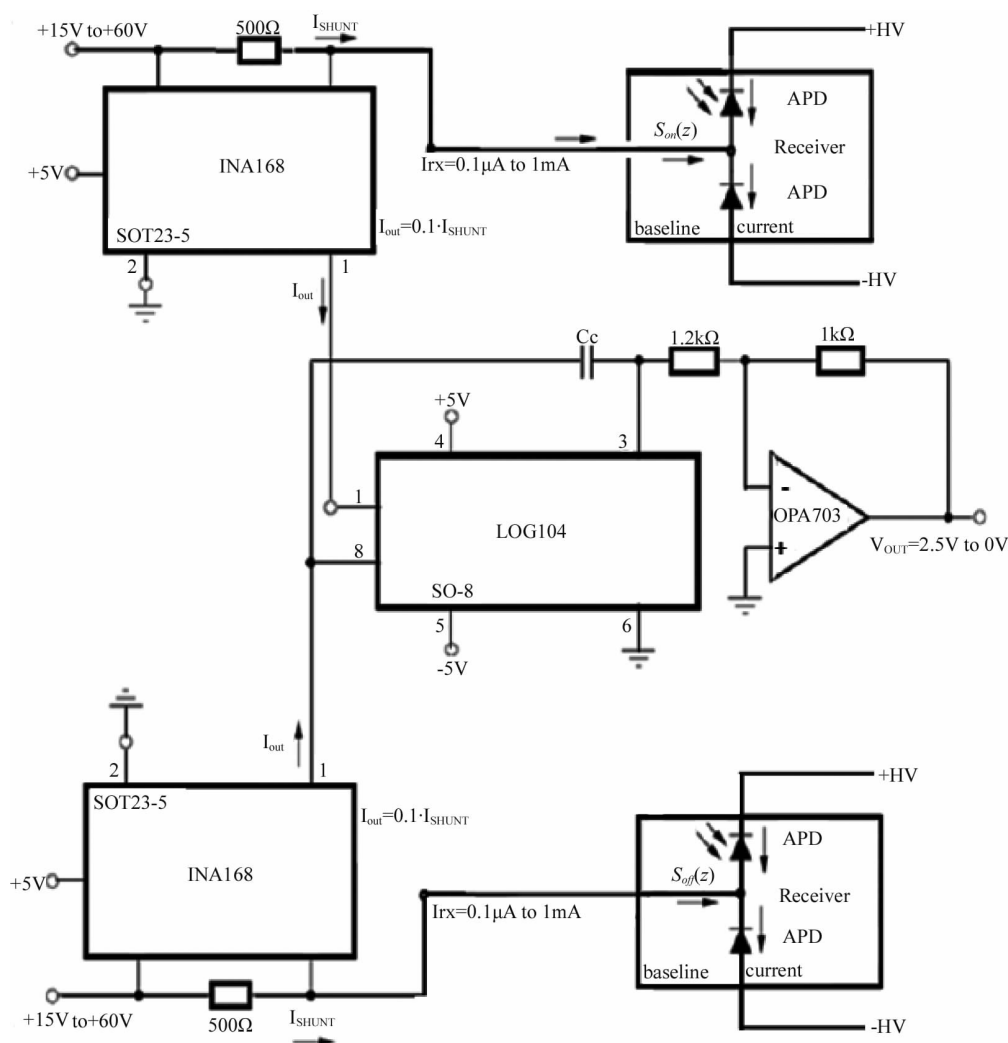


图 3 距离分辨差分吸收激光雷达的回波对数运算的流程框图

波光照时探测器也存在的电流。

OPA703 的输出电压经模数转换器变为数字信号。多个激光重复脉冲回波经对数模拟运算和数字化处理后累积平均，接着进行数值运算，最后得到大气压力的高度分布廓线。数字信号处理芯片 DSP 可以实时完成这项工作。

2.2 基于路径积分差分吸收激光雷达的地表压力运算

在用路径积分差分吸收激光雷达进行对地观测时，分别同时检测脉冲发射能量 E_{on} 与 E_{off} 和同时检测地面回波脉冲能量 $S_{on}(R)$ 与 $S_{off}(R)$ ，其中 R 为发射机到地面的距离。通过将式(5)和式(6)相除并对收/发能量之比求对数，可以得到两个波长的光学厚度差。地表

大气压力 $p(R)$ 与这个光学厚度差之间存在以下对应关系：

$$p(R) \sim OD_{off} - OD_{on} = \frac{1}{2} \ln \left[\frac{S_{off}(R)/E_{off}}{S_{on}(R)/E_{on}} \right] \quad (8)$$

0~R 之间没有距离分辨能力。

基于 10 ns 发射脉冲，用 s3972-Si-PIN 探测器检测能量并用 OPA847 宽带跨导放大器（见图 4）将光电流线性转换成电压信号（正比于发射光脉冲的功率），然后将其送至 TC510 双斜数字积分器（见图 5）^[12]；接着把这个电压信号积分成电荷值（正比于发射光脉冲的能量）并输出数字信号。地面回波脉冲相对于发射脉冲有些展宽（如 50 ns），信号也弱得多。用 First Sensor AD1500-10 雪崩二极管对其进行

探测并用 OPA847 宽带跨导放大器把光电流转换成电压信号, 然后将其送至 TC510 双斜数字积分器, 同样把这个电压信号积分成电荷值并输出数字信号(正比于回波脉冲的能量)。

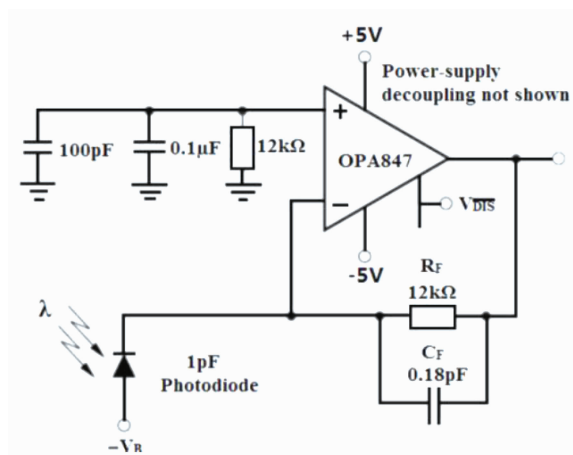


图 4 OPA847 高灵敏度宽带跨阻放大器

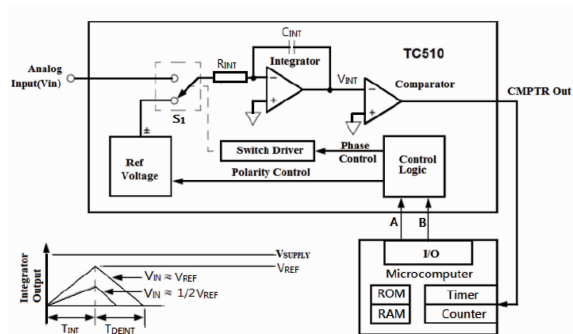


图 5 TC510 高精度双积分模数转换器

图 6 中, 因为脉冲能量检测(模拟电路实现)输出的就是数字信号, 所以后面的除法运算、对数运算以及数值反演都是数字化处理。

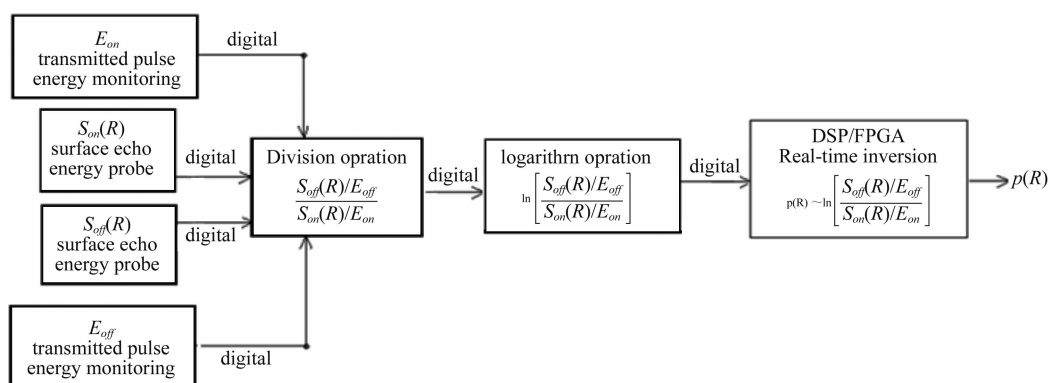


图 6 路径积分差分吸收激光雷达的信号处理流程

这些过程对于 online 和 offline 来说仍然是对称处理。 $p(R)$ 表示大气压力。总之, 通过实现探测电子学对称性的安排, 可以充分发挥系统差动原理的优势, 进而提高双波束的共模抑制比。

3 结束语

基于差分吸收激光雷达系统的对称性可以对大气随机干扰和目标后向散射变化进行更好的共模抑制, 这样有利于提高系统的探测精度。系统的对称性包括双波长光学配置的一致性以及地位相同的电子学模块和电子器件特性的近似性, 它是差分系统的工作基础之一。除了目标气体(氧气)吸收不同之外, 其他光电性能应当相近。探测光束与参考光束偏振正交, 两者被偏振合束器合在一起, 经同一个 1/4 波片后变为圆偏振光。回波通过 F-P 标准具、偏振分束器和 1/4 波片组合后, 又分成探测光束回波和参考光束回波, 并被两个通道分别检测。激光脉冲同时发射、回波同时接收, 双波长的光学后向散射相同, 途经的大气路径也相同。该方法可消除由大气运动随机性带来的干扰, 并可解决由目标不同反射系数变化带来的回波在两个波长之间改变的问题。接收机回波的预理由电子电路硬件完成。通过平衡安排电子器件的配置, 可以进一步发挥差分降误差的作用。将探测光束和参考光束先合起来发射、接收后再分开检测的方法是对以往差分吸收激光雷达系统构建的一次有益补充。我们不

久将会对每个结论添加实证数据, 并进一步报道这方面的实验测试结果。

致谢

感谢中国气象局气象探测中心的姚波博士和赵培涛博士的热心帮助!

参考文献

- [1] Murray E R. Remote Measurement of Gases Using Differential Absorption Lidar [J]. *Opt Engineering*, 1978, **17**(1): 30–38.
- [2] 胡顺星, 胡欢陵, 吴永华, 等. L625 差分吸收激光雷达探测对流层臭氧 [J]. *光学学报*, 2004, **24**(5): 597–601.
- [3] 张寅超, 胡欢陵, 谭锴, 等. AML-1 车载式大气污染监测激光雷达样机研制 [J]. *光学学报*, 2004, **24**(8): 1025–1031.
- [4] Hannes Vogelmann, Thomas Trick. Wide-range Sounding of Free-tropospheric Water Vapor with a Differential-absorption Lidar (DIAL) at a High-altitude Station [J]. *Applied Optics*, 2008, **47**(12): 2116–2132.
- [5] Jérôme C, Yannig D, Jean-Loup B. Performance Modeling for A-SCOPE, a Space-borne Lidar Measuring Atmospheric CO₂ [C]. SPIE, 2009, **7479**: 74790E.
- [6] Flamant C N, Schwemmer G K, Korb C L, et al. Pressure Measurements Using an Airborne Differential Absorption Lidar. Part I: Analysis of the Systematic Error Sources [J]. *Journal of Atmospheric & Oceanic Technology*, 1999, **16**(5): 561–574.
- [7] Korb C L, Schwemmer G K, Famiglietti J, et al. Differential Absorption Lidars for Remote Sensing of Atmospheric Pressure and Temperature Profiles [R]. Final Report, 1995: 1–5.
- [8] 王欢雪, 刘建国, 张天舒. Estimation of random errors for lidar based on noise scale factor [J]. *中国物理 B*, 2015, **24**(8): 084213.
- [9] Paolo Francesco Ambrico, Aldo Amodeo, Paolo Di Girolamo, et al. Sensitivity Analysis of Differential Absorption Lidar Measurements in the Mid-infrared Region [J]. *Applied Optics*, 2000, **39**(36): 6847–6865.
- [10] Dombrowski M, Schwemmer G K, Korb C L. A Lidar System for Measuring Atmospheric Pressure and Temperature [C]. SPIE, 1990, **1222**: 194–204.
- [11] Vladimir A K, William E. Elastic Lidar Theory, Practice, and Analysis Methods [M]. Hoboken: John & Sons, Inc, 2004.
- [12] Raymond M M. Laser Remote Sensing Fundamentals and Application [M]. New York: Wiley, 1984.
- [13] Sasano Y, Kobayashi T. Feasibility Study on Space Lidars for Measuring Global Atmospheric Environment [R]. Final Report, 1995: F–82.
- [14] 童诗白, 华成英, 叶朝辉. 模拟电子技术基础 (第五版) [M]. 北京: 高等教育出版社, 2015.
- [15] 阎石, 王红. 数字电子技术基础 (第六版) [M]. 北京: 高等教育出版社, 2016.