

文章编号 1004-924X(2026)03-0376-17

时谱复用合成多基线气体透射比测量系统

宋世豪¹, 杨卓异², 张海涛^{2*}, 孟 阔¹, 赵震欧¹, 耿东岷³

(1. 北京信息科技大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100192;

2. 清华大学 精密仪器系 时空信息精密感知技术全国重点实验室, 北京 100084;

3. 四川省分析测试服务中心, 四川 成都 610000)

摘要:针对现有多基线气体透射比测量系统存在稳定性不足、光路对准精度难以保证、成本高昂以及难以实现紧凑型设计等问题,研究一种能够在有限空间内实现多种基线的稳定切换,并且接收机可共用的气体透射比测量系统。该系统基于时谱复用合成原理,通过集成化的多波长共孔径激光光源与分光镜、宽带反射镜等镜组的结合,形成多种基线的折返光路,在不同时隙选通不同波长实现多种基线的稳定切换,最终多个波长信号在空间上合成为一条光路进入单个接收机,用于气体透射比计算。实验结果表明,在考虑收发系统误差和局部组件偏移的综合场景下,多基线系统在低透射比和高透射比的测试中分别将气体透射比示值误差从单基线系统的 1.99% 和 25.58% 降低至 0.38% 和 7.23% 以内,抑制了系统衰减和局部干扰的影响,为复杂气象条件下的精确监测提供了解决方案。

关键词:光电测量;多基线;主动探测;气体透射比

中图分类号:TH744 文献标识码:A

doi:10.37188/OPE.20263403.0376

CSTR:32169.14.OPE.20263403.0376

Multiple baselines gas transmittance meter based on time-spectrum multiplexing combination

SONG Shihao¹, YANG Zhuoyi², ZHANG Haitao^{2*}, MENG Kuo¹, ZHAO Zhenou¹, GENG Dongxian³

(1. School of Instrument Science and Optoelectronic Engineering, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China;

2. State Key Laboratory of Precision Space-Time Information Sensing Technology, Department of Precision Instrument, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

3. Analysis and Test Center of Sichuan Province, Chengdu 610000, China)

* Corresponding author, E-mail: zhanghaitao@mail.tsinghua.edu.cn

Abstract: To overcome the limitations of existing multi-baseline gas transmittance meters, including inadequate stability, difficulty in maintaining optical-path alignment accuracy, high cost, and limited compactness, a gas transmittance meter is proposed that enables stable multi-baseline switching within a confined space while sharing a single receiver. Based on time-spectral multiplexing, an integrated multi-wavelength filled-aperture laser is combined with optical components, including beam splitters and broadband reflectors, to construct folded optical paths with multiple baselines. Distinct wavelengths are gated in separate

收稿日期:2025-12-23;修订日期:2026-01-05.

基金项目:四川省科技计划资助项目(No. 2024YFHZ0002)

time slots to realize stable baseline switching. The multi-wavelength signals are spatially combined into a single optical path and detected by a single receiver for gas transmittance calculation. Experimental results demonstrate that, under comprehensive conditions incorporating errors from both the transceiver system and local components, the proposed multi-baseline system reduces gas-transmittance indication errors from 1.99% and 25.58% in a single-baseline system to within 0.38% and 7.23% in low- and high-transmittance tests, respectively. These results indicate effective suppression of system attenuation and local interference, providing a practical solution for accurate monitoring under complex meteorological conditions.

Key words: photoelectric measurement; multiple baselines; active detection; gas transmittance

1 引言

在气体检测技术领域,透射比是气体的固有光学性质,可用于反演气体的环境质量参数,如消光系数、气体浓度、能见度等,准确的气体透射比测量对航空、航海、陆上交通、天文观测以及军事活动具有重要意义^[1-6]。物体发射或反射的光线在气体传输受到气体分子和粒子吸收与散射影响,能量逐渐衰减^[7]。由于基于直接衰减测量原理的气体透射比测量方法直接符合光学传输衰减特性^[8],且相比前向散射式测量以及被动测量等其他原理测量仪器误差更小^[9],故在许多国际参数测量比对中被选为参考仪器^[10]。

传统基于直接衰减测量原理的气体透射比测量系统通常采用单基线测量方式,即发射器和接收器之间固定一个基线距离,通过测量激光信号在该基线距离上的衰减来计算大气透射比。Cheng等研制了一种气体透射仪,通过光的透射获取气体透射比的大小,判定环境情况,其监测误差为10%~20%^[11]。Xiao等采用白色LED光源,所设计的气体透射仪在2~10 km量程内测量误差小于10%^[12]。Ye等设计了单端透射表检测隧道气体,通过使用不同透射比滤光片验证了该装置可以实时检测出采样路径中的透射比并反演出消光系数,最大测量相对误差为8.4%^[13]。采用多次折返式设计延长基线长度能够扩展透射仪在高透射比环境下的适应性。Wang等改进了传统透射仪的结构,利用反射镜构成开放气室,实现了激光往返式透射法测量,具有抗环境污染能力强和测量灵敏度可调等独特优点^[14]。Li等通过长度10 m的多次反射计算光束衰减至5%的距离,从而获得精确的气体消光系数^[15]。Cao等研究了单基线透射比示值误差的影响因

素,主要由重复性测量不确定度和滤光标准器不确定度构成^[16]。Tao等通过对透射比示值误差进行多项式拟合,建立了一种透射比示值误差修正模型^[17]。单基线透射比测量系统已经得到了广泛研究,然而,由于单基线测量方式采样体积单一,环境对系统的污染、光源在长时间使用后的功率波动及探测器系统的性能衰减等均会对测量精度产生严重影响^[18-20]。

多基线气体透射比测量系统通过在不同基线距离上进行测量,可以获取更丰富的气体透射比信息,对数据进行综合运用后,可提高测量的准确性和可靠性^[21]。传统多基线气体透射比测量系统在实现过程中面临以下挑战:现有的方法中,为了实现多基线变换,通过物理移动发射器、接收器或反射镜等组件来改变基线距离,中国民航大学提出了一种可变基线气体透射比测量方法,通过高精度滑轨实现基线可变设计,根据多点测量计算出气体透射比^[22-26]。由于该类方法依赖滑轨的物理移动,系统稳定性受到滑轨本身定位精度的影响,每次移动后的光路对准精度与基线长度均难以保证,若基线较长则对准更加困难,导致测量结果不准确^[27-28];另一种方法通过光路设计与多接收机的组合实现多基线切换,Xie等设计了一种双基线双光路结构,通过分光镜将一个光源入射至两个接收器,实现双基线设计,从而消除系统窗口污染以及光发射强度波动的影响^[29]。Liu等设计了一套对称式双发双收测控系统,可实现收发距离可调的气体透射比测量^[30]。然而,通过配备多个接收机来接收不同基线传输后的激光信号,不仅增加了仪器的复杂性和成本,而且使得仪器在结构上难以实现紧凑型设计,不利于其在有限空间内的安装和使用。

为此,本文研究了一种能够稳定切换多种基

线,并且接收机可共用,能够在有限空间内实现多次折返基线传输的紧凑型气体透射比测量系统。该系统基于时谱复用合成原理,通过多波长激光发射体制和分光光学镜组实现了不同波长的激光在不同时隙、沿不同基线传输的功能,可有效测量多基线的气体透射比,在进行数据综合运用后,降低误差影响并显著提高测量结果的稳定性,从而满足复杂多变测量环境的应用需求。

2 原 理

2.1 多基线气体透射比测量方法

传统的单基线气体透射比测量系统通常采用多次平均的方法来削弱测量过程中的随机误差,计算得到气体透射比,计算公式可表示为:

$$T = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m T_i, \quad (1)$$

其中: m 为数据平均次数, T_i 为单次测量得到的透射比数值。

该方法会受到系统误差的影响,如光源与探测器性能衰减、光学镜片污染、光轴偏离等,导致测得的透射比与实际气体环境不符。多基线气体透射比测量方法通过测量不同基线长度上的气体透射比,得到气体透射比与基线的关系数组,进而得到精确的气体透射比,用于反演气体消光系数、浓度和能见度等参数^[8]。

在多基线透射比测量过程中,首先设计最短基线长度(接近于0),此时光从激光发射端发出后直接传输到接收端的光电探测器,不经过气体。 E_1 表示此时系统所产生的光能量的衰减,即由系统本身(不包含气体衰减)所造成的光能衰减,表示为:

$$E_1 = P_e - P_r(L_1), \quad (2)$$

其中: P_e 表示激光发射端的发射功率, L_1 表示最短基线, $P_r(L_1)$ 表示在最短基线的条件下接收端光电探测器接收到的功率。

设置 n 个不同的基线,表示为 $L_i (i=1, 2, \dots, n)$ 。当系统切换到第 i 个基线条件下的光路时, $P_r(L_i)$ 表示接收端光电探测器在第 i 个基线长度条件下接收到的功率,此时系统的光能衰减表示为:

$$E_i = P_e - P_r(L_i), \quad (3)$$

其中: E_i 表示整个测量系统产生的总的光衰减量,既包含第 i 个基线长度的气体所造成的光衰减量 $E_i^{L_i}$,也包含了系统本身所产生的光衰减量 E_1 ,表示为:

$$E_i = E_i^{L_i} + E_1. \quad (4)$$

考虑系统本身产生的光衰减量,可认为激光发射端的功率被削弱,实际发出功率为 $P_r(L_1) = P_e - E_1$ 。因此,气体透射比表示为:

$$T_i = \frac{P_r(L_i)}{P_r(L_1)}. \quad (5)$$

从上式中可以看出,第 i 个基线下所测得的气体透射比与系统固有衰减 E_1 无关,即多基线 ($n \geq 2$) 测量方法能够消除在测量过程中,由于环境对系统的污染、光源在长时间使用后的功率波动、探测器系统的性能衰减等因素对测量系统造成的不利影响。

多基线测量系统在一个周期的测量中,会测得多个基线条件下的多个透射比结果,表示为 $T_i (i=1, 2, \dots, n)$,最短基线长度用于修正其他基线透射比,因此多基线透射比测量方法可以得到 $n-1$ 个气体透射比。

2.2 系统性能测试方法

在评估基于光束透射比原理的设备性能时,一种有效方法是构建一个可控的、已知衰减量的测试环境。该方法的核心逻辑在于通过在被测仪器的光路中精确引入一系列具有确定衰减值的标准器件,以人为地模拟出仪器在实际应用中可能遇到的不同工况条件^[13,31-32]。对于多种基线,通过分别置入光谱中性透射比标准滤光量具组(标准滤光量具组选用有效透光面积大于被测系统光斑的滤光量具)来测试系统整体性能。

在被测系统的光源与光电探测器之间的光路上依次加入标准中性滤光量具,保证滤光量具平面垂直于光束,待稳定后读取仪器示值,各透射比测量点重复测量多次,计算出每一个测量点的透射比示值误差:

$$\Delta T_{ik} = T_{ik} - T_{sk}, \quad (6)$$

其中: ΔT_{ik} 表示第 i 个基线第 k 测量点条件下的透射比示值误差, T_{ik} 表示第 i 个基线第 k 测量点条件下的测量值, T_{sk} 表示第 k 测量点条件下的透射比标准值。

3 实验

3.1 实验系统构成

时谱复用合成多基线气体透射比测量系统由多波长电光切换激光发射模块、级联折返式宽带反射镜阵列模块、第一波长截止型分光镜阵列模块、第二波长截止型分光镜阵列模块与多通道自适应光电信号接收模块组成。时谱复用合成多基线气体透射比测量系统结构如图1所示。多波长电光切换激光发射模块用于产生3种不同波长的激光,进行光束准直后输出;级联折返式宽带反射镜阵列模块用于多次反射3个波长的激光;第一波长截止型分光镜阵列模块用于多次反射第一个波长的激光,并对第二、第三个波长透射;第二波长截止型分光镜阵列模块用于多次反射第二个波长的激光,并对第三个波长透射;多

通道自适应光电信号接收模块用于接收经过3个基线长度传输后的激光信号,并能够针对不同基线进行单独光电转换和信号处理运算,得到气体透过率结果。该系统不局限于3种基线,通过在光路中增加第 $(N-1)$ 波长截止型分光镜阵列模块,并在多波长电光切换激光发射模块中增加对应波长,可灵活扩展为 N 种基线($N \geq 3$)。

多波长电光切换激光发射模块主要由多波长共孔径激光光源、可编程驱动电流源、宽谱带输出尾纤、多波长增透消色差光纤准直器和五维位移精密调整平台构成。多波长共孔径激光光源为集成化的共口径输出光源,光源型号为Wavespectrum Laser公司的Triplex-WSLX-RGB-010m-4-H-T,实际中心波长参数分别为450.7,521.9和641.0 nm(以下简称蓝光、绿光、红光),该激光器中的红、绿、蓝三色激光可独立

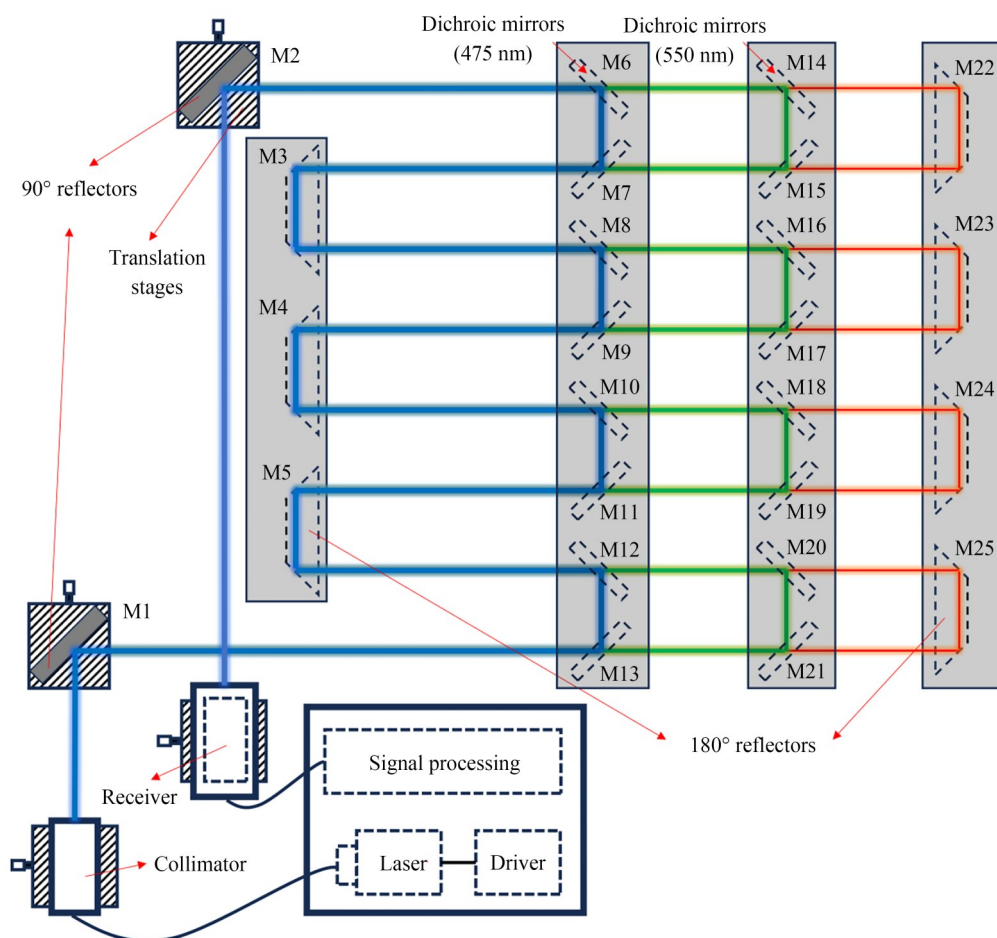


图1 时谱复用合成多基线气体透射比测量系统结构(其中M表示光学镜片,如M1表示第1个光学镜片)

Fig. 1 Multiple baselines atmospheric transmittance meter based on time-spectrum multiplexing combination(M denotes an optical lens, such as M1 indicating the first optical lens)

供电控制,并耦合至单根光纤实现共孔径输出,出光功率实测为蓝光1.53 mW,绿光1.14 mW,红光2.12 mW,能够为光电探测器提供足够信号。可编程驱动电流源对多波长共孔径激光光源供电,并根据控制指令驱动多波长共孔径激光光源中的特定波长在不同时隙发光。光源功率稳定性方面,功率波动会反映在接收端光电压信号测量值上并影响透射比计算结果,尤其在测量高透射比气体时则可能掩盖微弱衰减信号。因此,采用LDTC0520型电流温控一体化驱动(24 h长时温控稳定性为0.008℃),连接至光源内置热敏电阻与TEC接口以维持恒温状态,有效抑制功率漂移,使得激光器在三波长下的功率波动(均方根偏差)低至0.94%。光源频率稳定性方面,频率波动会影响光学镜片的实际透过率与探测器响应度,选用波长敏感系数低至0.05 nm/℃的激光器,并借助温控措施使频率波动低至0.4 pm,保障了多波长通道的长期频率稳定性。宽谱带输出尾纤接收并传输多波长共孔径激光光源发出的激光,采用3 μm芯径单模光纤(数值孔径为0.12)实现优良光束质量,尾端为FC/APC接头,减少回光。多波长增透消色差光纤准直器采用Thorlabs公司的C40APC-A,用于将激光准直为平行光束,实测发散角分别为蓝光0.17 mrad,绿光0.21 mrad,红光0.39 mrad,内置高精度透镜组,所有透镜均镀有对3种波长增透的膜层,并通过FC/APC接头与宽谱带输出尾纤尾端连接,多波长增透消色差光纤准直器固定于一个五维位移精密调整平台上,五维位移精密调整平台用于精密调整多波长增透消色差光纤准直器的 x, y, z 位移以及俯仰、偏摆角度的五维参数,从而实现对接射激光位置及角度的控制。

级联折返式宽带反射镜阵列模块包含始端4个宽带180°反射镜和末端4个宽带180°反射镜,通过对3种波长的多次折返,在紧凑空间内实现长基线传输,从而增大系统测量高气体透射比环境的能力。

第一波长截止型分光镜阵列模块包含8个475 nm截止型分光镜。该分光镜通过镀膜实现对475 nm截止,475 nm截止型分光镜在入射面上镀有对蓝光增反的膜层,在入射面和出射面上镀有对绿光、红光增透的膜层,多个475 nm截止

型分光镜将蓝光反射,对绿光、红光透射,将3个波长的激光引导向不同的基线光路,8个475 nm截止型分光镜可将蓝光来回反射8次。

第二波长截止型分光镜阵列模块包含8个550 nm截止型分光镜,该分光镜通过镀膜实现对550 nm截止,550 nm截止型分光镜在入射面上镀有对绿光增反的膜层,在入射面和出射面上镀有对红光增透的膜层,多个550 nm截止型分光镜将绿光反射,对红光透射,将两个波长的激光引导向不同的基线光路,8个550 nm截止型分光镜可将绿光激光来回反射8次。

多通道自适应光电信号接收模块包括光电探测器、自适应气体透射比运算电路和五维位移精密调整平台。光电探测器型号为HAMA-MATSU公司的S2506,有效面积为2.77 mm×2.77 mm,在3个波长下的响应度分别为0.24 A/W,0.29 A/W和0.37 A/W,响应度较高且随波长变化较为平滑,有利于多通道电信号的高效转化。光电探测器固定于五维位移精密调整平台上,五维位移精密调整平台调整光电探测器的 x, y, z 位移以及俯仰、偏摆角度的五维参数,确保在多个基线下实现对接角度的精确控制。接收镜头直径32 mm、焦距22 mm,将接收到的激光聚焦,聚焦后的激光入射到光电探测器感光面上,转换为电信号,发射端光斑直径分别为蓝光13.0 mm,绿光17.5 mm,红光21.0 mm,基线长度分别为1.3,3.8,6.4 m,接收镜头处的光斑大小分别为13.4,19.1,26.0 mm,远距离传输后光斑尺寸均小于接收镜头直径32 mm。通过计算可得探测面处光斑直径分别为蓝光0.243 μm,绿光0.209 μm,红光0.214 μm,小于对应艾里斑直径(蓝光0.756 μm,绿光0.875 μm,红光1.075 μm),与探测器有效面积存在3个数量级差异,可实现探测面对光斑的全覆盖。通过微扰多波长电光切换激光发射模块与多通道自适应光电信号接收模块中五维位移精密调整平台的位移、角度,在多通道自适应光电信号接收模块的电压信号最大时,停止微扰,实现光路收发对准^[33]。自适应气体透射比运算电路接收光电探测器转换的电信号,并能够针对特定波长进行信号处理和运算,最终输出多个基线气体透射比测量结果。

3.2 实验系统工作流程

初始化阶段,各部件调整至预设位置,将多波长共孔径激光光源的宽谱带输出尾纤与多波长增透消色差光纤准直器连接,并将多波长增透消色差光纤准直器固定于发射端五维位移精密调整平台上,将光电探测器固定于接收端五维位移精密调整平台上。

系统工作时,打开可编程驱动电流源,选通蓝光,驱动多波长共孔径激光光源发射蓝光,激光经宽谱带输出尾纤输出至多波长增透消色差光纤准直器进行准直后,传输至475 nm截止型分光镜阵列模块的第一个475 nm截止型分光镜,利用475 nm截止型分光镜阵列模块和始端4个宽带反射镜的多次反射将激光导向第一基线光路。多通道自适应光电信号接收模块接收经过第一基线传输后的激光,经接收镜头聚焦和光电探测器光电转换后,得到电压信号。微扰多波长电光切换激光发射模块与多通道自适应光电信号接收模块中五维位移精密调整平台的位移、角度,使得多通道自适应光电信号接收模块的电压信号最大,保持电压信号最大时的定位状态。在电压信号最大时,自适应气体透射比运算电路进行处理和运算,计算出射光电压 V_0 与接收光电压 V_1 的比值,得到第一基线气体透射比测量结果如下:

$$K_1 = \frac{V_1}{V_0} \propto K_0 e^{-\mu L_1}, \quad (7)$$

其中: K_0 代表收发端中系统误差形成的透过率, μ 代表气体消光系数, L_1 代表第一基线长度。

选通绿光,驱动多波长共孔径激光光源发射绿光,激光经准直、多次反射与光电转换后,自适应气体透射比运算电路进行处理和运算,计算出射光电压 V_0 与接收光电压 V_2 的比值,得到第二基线气体透射比测量结果如下:

$$K_2 = \frac{V_2}{V_0} \propto K_0 e^{-\mu L_2}, \quad (8)$$

其中, L_2 代表第二基线长度。

选通红光,驱动多波长共孔径激光光源发射红光,激光经准直、多次反射与光电转换后,自适应气体透射比运算电路进行处理和运算,计算出射光电压 V_0 与接收光电压 V_3 的比值,得到第三

基线气体透射比测量结果如下:

$$K_3 = \frac{V_3}{V_0} \propto K_0 e^{-\mu L_3}, \quad (9)$$

其中, L_3 代表第三基线长度。

第一基线用于感知收发端中存在的系统误差,因此第二、第三基线的透射比结果可修正为:

$$K'_2 = \frac{K_2}{K_1} \propto e^{-\mu(L_2-L_1)}, \quad (10)$$

$$K'_3 = \frac{K_3}{K_1} \propto e^{-\mu(L_3-L_1)}. \quad (11)$$

在修正后,收发端中存在的系统误差对透过率测量结果的影响 K_0 可消除。若需扩展至 N 种基线($N \geq 4$),在多波长共孔径激光光源中增加至第 N 种波长,从第一、第二波长截止型分光镜阵列模块增加至第三、第四直至第 $(N-1)$ 波长截止型分光镜阵列模块,按同样步骤得到第 N 基线气体透射比测量结果。

在近似理想环境(如超净实验室)下,通过引入已知透射比的标准滤光量具来模拟仪器在实际应用中可能遇到的衰减工况。因此,用标准滤光量具的标称透射比 K_s 代替气体衰减项,第二、第三基线的透射比修正结果表示为:

$$K'_2 = \frac{K_2}{K_1} \propto K_s, \quad (12)$$

$$K'_3 = \frac{K_3}{K_1} \propto K_s. \quad (13)$$

将多种基线下测得的修正透射比取平均值得到 $\overline{K'}$,作为系统最终透射比测量结果。将该结果与标准滤光量具的标称透射比进行比较,以验证设备性能。

4 结果与讨论

通过系统的实验,验证所提出的时谱复用合成多基线气体透射比测量系统的性能与可靠性。首先,对收发端模块进行基础性能评估,通过采用一系列不同透射比的标准量具,检验其测量精度与稳定性。其次,针对多基线测量系统的优势开展深入分析,通过考虑实际应用中常见的系统误差与光学组件偏差,并对比单基线与多基线测量结果,以说明多基线方法在提升测量准确性、抑制干扰方面的有效性。最后,对系统的实验误

差因素、优势与优化方向进行分析。

4.1 收发端性能测试结果

收发端性能测试旨在评估时谱复用合成多基线气体透射比测量系统中收发端模块的性能,即激光发射模块与光电接收模块的协同工作能力。通过设计专门的实验测试,验证系统在多种透射比条件下的测量准确性和稳定性。实验选用 5 种标准滤光测试量具,其标称透射比分别为 5.82%, 54.58%, 91.90%, 97.98% 和 99.33%, 这些值包含了低、中、高透射比,能够有效模拟实际气体环境中的多种衰减场景,从而检验系统的动态响应特性。

测试过程中,将每种滤光测试量具依次置于系统的光路中,确保滤光测试量具平面垂直于激光光束,以最小化安装误差。系统在稳定工作状态下,对每种滤光测试量具进行多次重复测量,记录透射比示值。通过计算测量值与滤光测试量具标准透射比之间的示值误差,来量化系统的性能,较小的误差值表明系统具有较高的精度和可靠性。

图 2 给出了收发端在多种透射比量具下的性能测试曲线,表 1 给出了收发端在多种透射比量具下的性能测试结果。实验结果显示,对于所有滤光测试量具,系统的透射比示值误差均保持在较低水平。这得益于以下设计:首先,激光光源通过 TEC 温控设计实现恒温,抑制了功率漂移,维持了功率稳定性;其次,系统通过驱动电流源对激光光源进行了一定频率的调制,并通过光电探测器进行对应频率解调,从而抑制了背景光噪

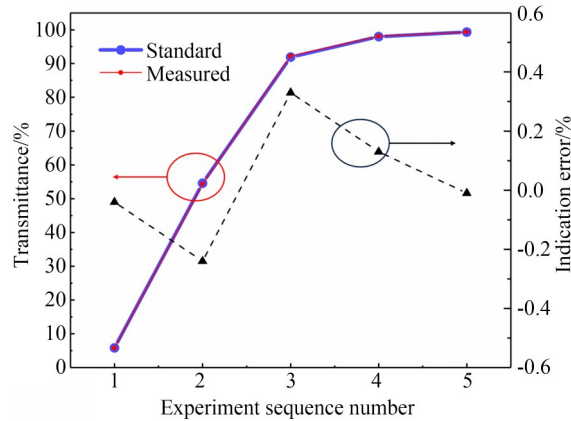


图 2 收发端在多种透射比量具下的性能测试曲线
Fig. 2 Various transmittance gauges test curve of transceiver

表 1 收发端在多种透射比量具下的性能测试结果

Tab. 1 Various transmittance gauges test results of the transceiver

Experiment sequence number	Standard transmittance/%	Measured transmittance/%	Indication error/%
1	5.82	5.78	-0.04
2	54.58	54.34	-0.24
3	91.90	92.23	0.33
4	97.98	98.11	0.13
5	99.33	99.34	-0.01

声的干扰;最后,五维位移精密调整平台的多维调整能力与稳定性,保障了光路长时对准精度,从而降低了误差。总体而言,收发端性能测试结果验证了系统在较宽范围透射比测量中的准确性和稳定性,为后续多基线测量提供了可靠基础。

4.2 多基线测量系统性能测试结果

为了评估多基线气体透射比测量系统在复杂误差条件下的性能,检验多基线测量系统的稳定性,实验中选取 8.60% 和 81.30% 两种透射比量具,分别模拟低透射比和中高透射比,从而完善多基线系统动态响应特性的验证^[34]。选用 8.60% 和 81.30% 两种透射比与前 5 种标准器件不同,是出于深化测试稳定性的考虑。具体而言,这种设计进一步验证了系统在非标准点上的性能表现,避免对标准校准点的过度依赖(过拟合),通过多个透射比点的交叉检验,能够更可靠地评估系统在不同衰减水平下的稳定性。测试主要针对 3 种常见误差场景展开:收发端系统误差测试、光学组件误差测试以及综合误差测试,通过对比单基线测量结果与多基线测量结果,验证多基线方法在抑制误差、提升测量准确性方面的优势。

针对收发端系统误差的测试,实验模拟了实际工作中存在的收发镜头污染、光源及探测器性能衰减等影响因素。通过在发射端前固定置入一个 81.30% 透射比的标准滤光片,以模拟系统固有的衰减误差。随后,分别将 8.60% 和 81.30% 的测试滤光片依次置于光路中,进行单基线和多基线测量对比,其中,单基线系统采用第三基线(对应红光)光路进行测量,多基线系统

采用第二基线(对应绿光)与第三基线光路进行测量,并将测量的透射比进行平均得到最终透射比,第一基线(对应蓝光)光路用于系统误差感知。表 2 给出了收发系统误差下单基线系统在多种透射比量具下的性能测试结果,表 3 给出了收发系统误差下多基线系统在多种透射比量具下的性能测试结果,图 3 给出了收发系统误差下单基线与多基线测量系统在多种透射比量具下的性能对比。结果显示,在单基线测量模式下,由于系统误差的引入,测量值显著偏离滤光片的标称值,对于 8.60% 滤光片,单基线测量结果偏差达到 1.60%,而对于 81.3% 滤光片,偏差达到 15.38%。相比之下,多基线测量通过综合运用不同基线的数据,修正了系统误差,测量结果更接近滤光片真值,偏差分别降低至 0.08% 和 0.44% 以下。这表明多基线方法能够有效消除收发端系统误差的影响,提升测量的准确性。

表 2 收发系统误差下单基线系统在多种透射比量具下的性能测试结果

Tab. 2 Various transmittance gauges test results of single baseline system under system error (%)

Experiment se- quence number	8.60% neutral density filter		81.30% neutral density filter	
	Measured transmittance	Indication error	Measured transmittance	Indication error
1	7.06	1.54	66.10	15.20
2	7.08	1.51	66.17	15.13
3	7.05	1.55	65.92	15.38
4	7.03	1.57	66.22	15.08
5	7.06	1.54	66.40	14.90
6	7.04	1.56	66.30	15.00
7	7.02	1.58	66.38	14.92
8	7.00	1.60	66.03	15.27
9	7.06	1.54	66.37	14.93
10	7.10	1.50	66.62	14.68

表 3 收发系统误差下多基线系统在多种透射比量具下的性能测试结果

Tab. 3 Various transmittance gauges test results of multiple baselines system under system error (%)

Experiment se- quence number	8.60% neutral density filter		81.3% neutral density filter	
	Measured transmittance	Indication error	Measured transmittance	Indication error
1	8.66	-0.06	81.27	0.03
2	8.68	-0.08	81.51	-0.21
3	8.53	0.07	81.74	-0.44
4	8.55	0.05	81.03	0.27
5	8.62	-0.02	81.52	-0.22
6	8.59	0.01	81.34	-0.04
7	8.66	-0.06	81.06	0.24
8	8.53	0.07	80.94	0.36
9	8.52	0.08	80.94	0.36
10	8.61	-0.01	80.99	0.31

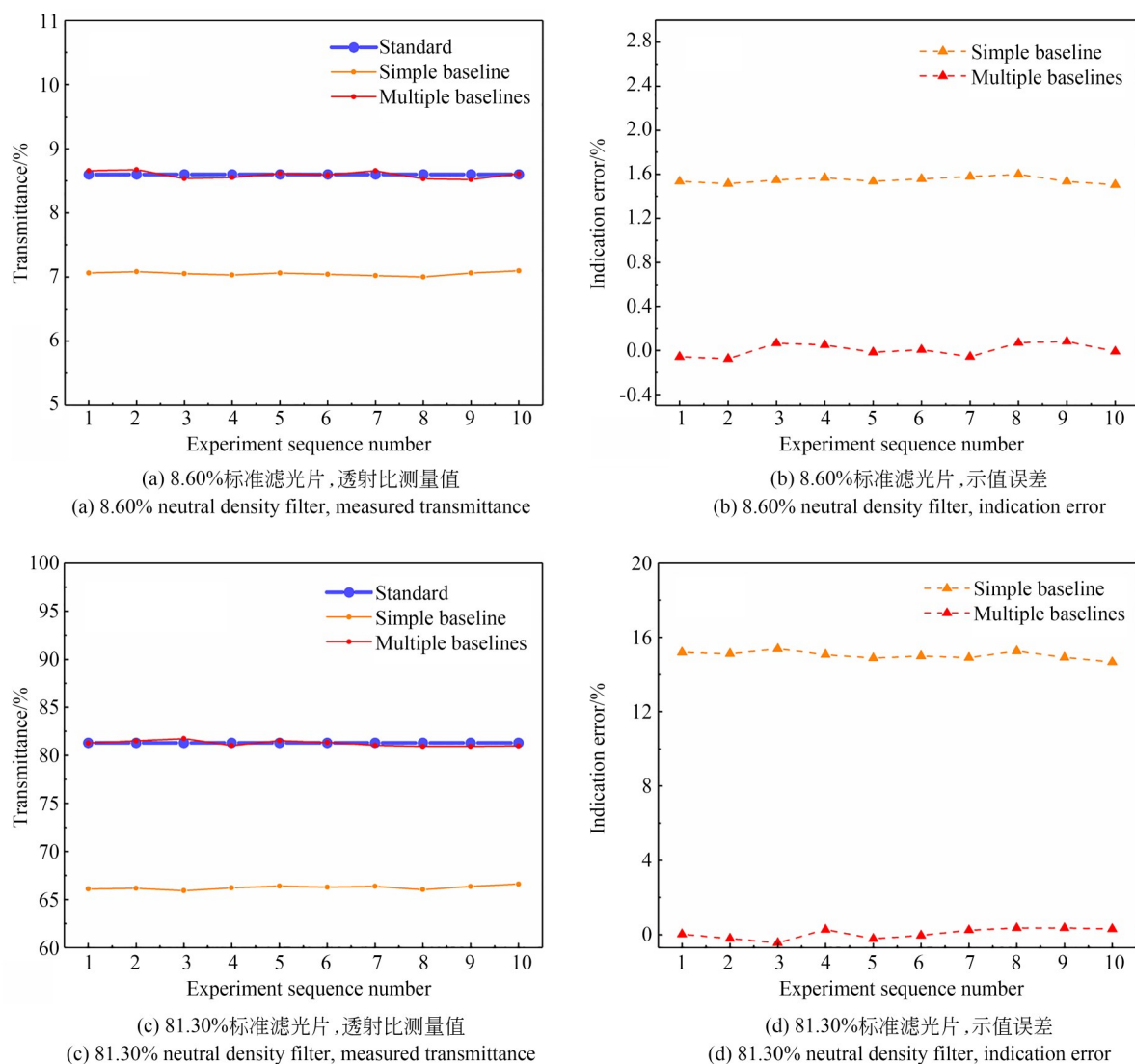


图3 收发系统误差下单基线与多基线测量系统在多种透射比量具下的性能对比

Fig. 3 Various transmittance gauges performance comparison of single baseline and multiple baselines systems under system error

移除模拟收发镜头污染、光源及探测器性能衰减的滤光片,进行单基线反射镜误差测试,以验证系统在局部光学组件偏差下的性能。实验中选择第三基线的反射镜(M25)进行人为偏移以降低接收端信号强度,模拟镜片长期使用导致的错位或脏污,而其他基线的光学组件保持正常状态。表4给出了光学组件偏差下单基线系统在多种透射比量具下的性能测试结果,表5给出了光学组件偏差下多基线系统在多种透射比量具下的性能测试结果,图4给出了光学组件偏差下单基线与多基线测量系统在多种透射比量具下的性能对比。在单基线测量中,受影响的第三基

线测量结果出现较大偏差,对于8.60%滤光片,偏差达0.63%,而对于81.30%滤光片,偏差达12.69%。而多基线测量通过整合未受影响的基线数据,抑制了局部误差的传播,最终测量结果与滤光片真值的偏差分别仅为0.36%和6.85%。这一结果凸显了多基线系统的容错能力,即使单个基线出现故障,通过多基线数据综合运用,整体气体透射比测量结果仍能保持较高可靠性。

最后,综合误差测试将上述两种误差场景结合,即在发射端加入81.30%滤光片模拟系统误差的同时对第三基线反射镜进行偏移,以模拟实

表 4 光学组件偏差下单基线系统在多种透射比量具下的性能测试结果

Tab. 4 Various transmittance gauges test results of single baseline system under optical component deviation (%)

Experiment sequence number	8.60% neutral density filter		81.30% neutral density filter	
	Measured transmittance	Indication error	Measured transmittance	Indication error
1	8.08	0.52	68.86	12.44
2	8.12	0.48	68.95	12.35
3	8.04	0.56	68.90	12.40
4	7.97	0.63	68.94	12.36
5	8.13	0.47	69.43	11.87
6	8.08	0.52	69.21	12.09
7	8.16	0.44	69.05	12.25
8	8.19	0.41	69.04	12.26
9	8.10	0.50	68.84	12.46
10	8.06	0.54	68.61	12.69

表 5 光学组件偏差下多基线系统在多种透射比量具下的性能测试结果

Tab. 5 Various transmittance gauges test results of multiple baselines system under optical component deviation (%)

Experiment sequence number	8.6% neutral density filter		81.3% neutral density filter	
	Measured transmittance	Indication error	Measured transmittance	Indication error
1	8.31	0.29	74.65	6.65
2	8.32	0.28	74.67	6.63
3	8.35	0.25	74.88	6.42
4	8.31	0.29	74.69	6.61
5	8.34	0.26	74.55	6.75
6	8.40	0.20	74.45	6.85
7	8.34	0.26	74.99	6.31
8	8.39	0.21	74.45	6.85
9	8.25	0.35	75.13	6.17
10	8.24	0.36	74.72	6.58

际存在的多种复杂情况。表6给出了综合误差下单基线系统在多种透射比量具下的性能测试结果,表7给出了综合误差下多基线系统在多种透射比量具下的性能测试结果,图5给出了综合误差下单基线与多基线测量系统在多种透射比量具下的性能对比。从实验结果中可见,单基线测量结果因误差叠加而严重失真,对于8.60%和81.30%滤光片,偏差分别达到1.99%和25.58%。而多基线测量通过数据融合与修正算法,显著降低了误差影响,测量偏差控制在

0.38%和7.23%以内。综合分析表明,多基线系统在不同透射比条件下均表现出更强的稳定性,能够有效应对多种误差源的干扰,确保测量结果更加稳定。

综上所述,多基线气体透射比测量系统通过时谱复用合成原理,实现了在误差条件下的高性能测量。实验验证了多基线方法在消除系统误差、抑制局部光学组件偏差以及应对综合干扰方面的优势,为复杂环境下的应用提供了可靠支撑。

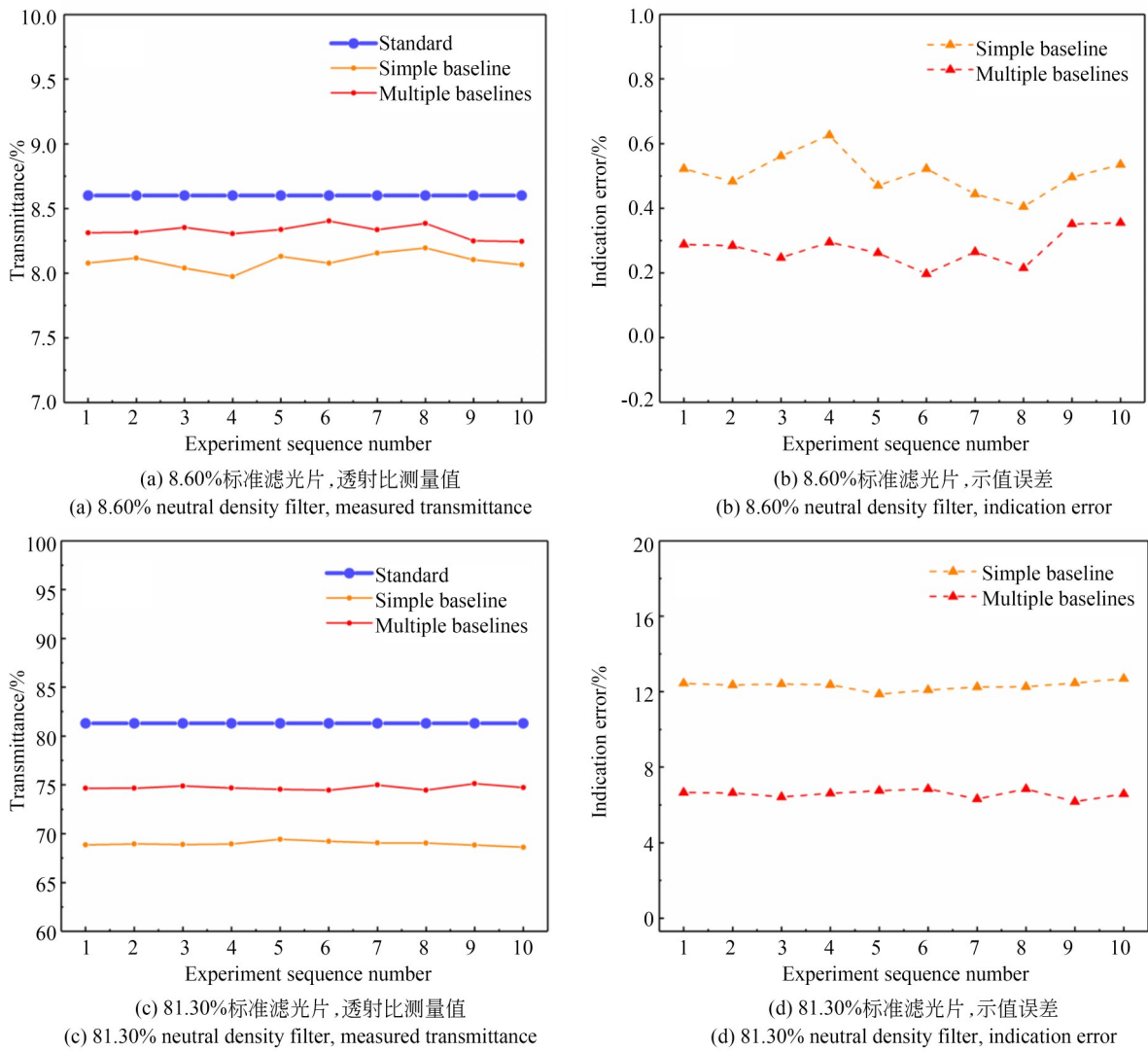


图 4 光学组件偏差下单基线与多基线测量系统在多种透射比量具下的性能对比

Fig. 4 Various transmittance gauges performance comparison of single baseline and multiple baselines systems under optical component deviation

表 6 综合误差下单基线系统在多种透射比量具下的性能测试结果

Tab. 6 Various transmittance gauges test results of single baseline system under composite errors (%)

Experiment sequence number	8.60% neutral density filter		81.30% neutral density filter	
	Measured transmittance	Indication error	Measured transmittance	Indication error
1	6.67	1.93	56.02	25.28
2	6.66	1.94	56.13	25.17
3	6.63	1.97	56.01	25.29
4	6.61	1.99	56.15	25.15
5	6.64	1.96	56.27	25.03
6	6.67	1.93	56.13	25.17
7	6.66	1.94	56.31	24.99
8	6.62	1.98	55.72	25.58
9	6.69	1.91	55.78	25.52
10	6.68	1.92	56.14	25.16

表 7 综合误差下多基线系统在多种透射比量具下的性能测试结果

Tab. 7 Various transmittance gauges test results of multiple baselines system under composite errors (%)

Experiment se- quence number	8. 6% neutral density filter		81. 3% neutral density filter	
	Measured transmittance	Indication error	Measured transmittance	Indication error
1	8. 32	0. 28	74. 50	6. 80
2	8. 29	0. 31	74. 49	6. 81
3	8. 33	0. 27	74. 67	6. 63
4	8. 39	0. 21	74. 65	6. 65
5	8. 44	0. 16	74. 38	6. 92
6	8. 35	0. 20	74. 28	7. 02
7	8. 30	0. 30	74. 98	6. 32
8	8. 22	0. 38	74. 07	7. 23
9	8. 42	0. 18	74. 90	6. 40
10	8. 29	0. 31	74. 82	6. 48

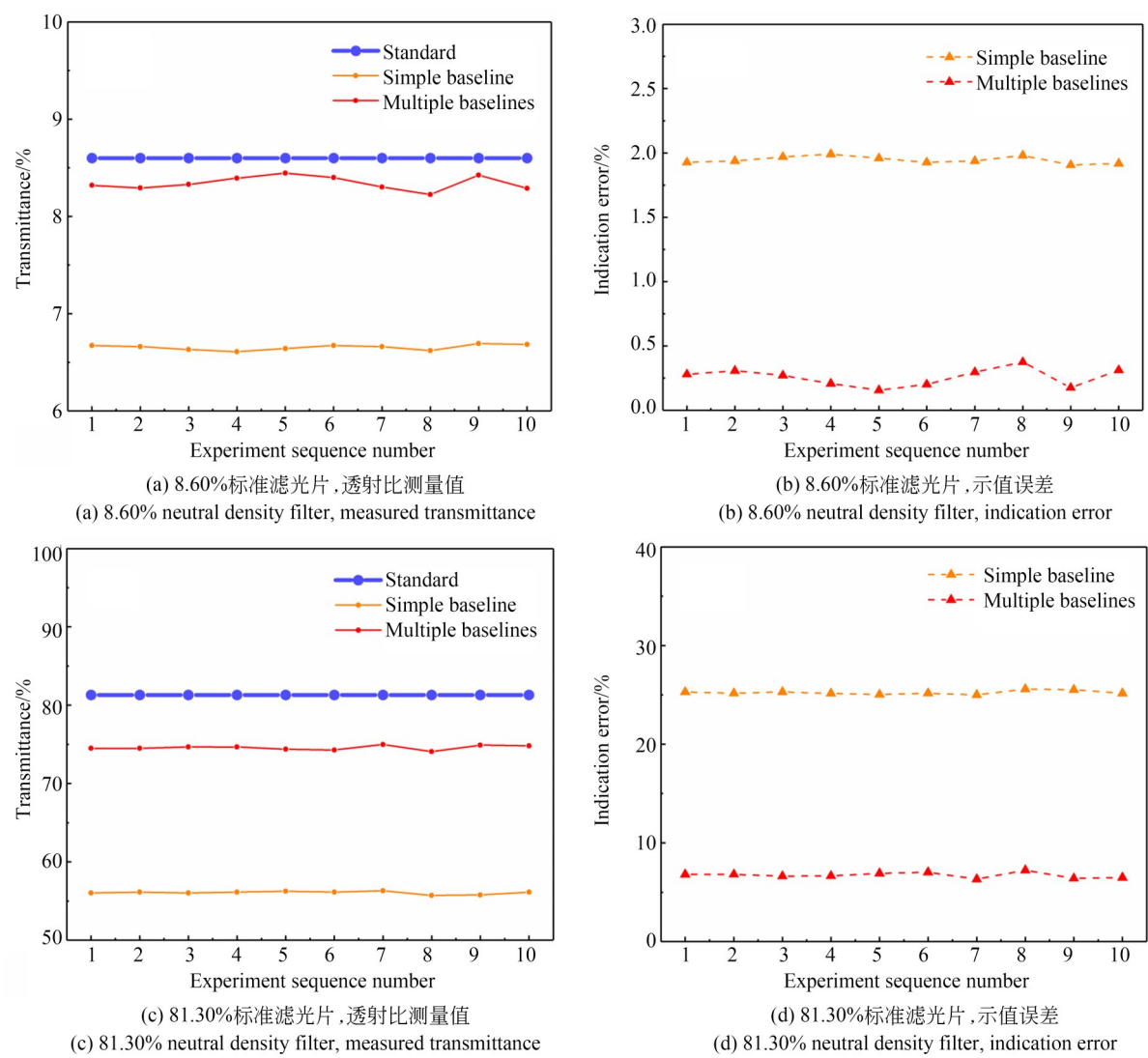


图 5 综合误差下单基线与多基线测量系统在多种透射比量具下的性能对比

Fig. 5 Various transmittance gauges performance comparison of single baseline and multiple baselines systems under composite errors

4.3 实验误差因素分析

本文系统相比传统多基线系统(如直线滑轨移动或多接收机方案)而言,在同等基线长度与基线数量下,时谱复用合成折返设计相比直线滑轨移动缩短了收发端距离,而接收机共用设计相比多接收机则减小了系统体积,有效压缩了整体尺寸,体现了紧凑优势。多基线、多镜片与多位移台组成的光学结构是本系统实现紧凑设计与稳定测量的关键,但由于组件较多,若各光学组件的空间位置调整不到位或长期工作状态下发生偏移,将引入实验误差,影响测量结果的可靠性。

现对系统的主要误差来源——光路对准偏差进行分析。光学元件的微小角度偏差会在长距离传播中被放大,在 6.8 m 最长基线(对应红光)条件下,离探测器最远的镜片 M1 的偏离对系统对准影响最大。红光在接收镜头处的光斑直径为 26 mm,而接收镜头直径为 32 mm,允许的横向最大偏移量为 ± 3 mm,在 6.8 m 基线下对应偏移半角度为 0.49 mrad。同时,考虑探测面的接收视场,在探测面尺寸 2.77 mm、镜头焦距 22 mm 的条件下,最大允许偏移半角度为 62.95 mrad。这些容差要求使得光路对准成为系统实现高精度测量的关键技术挑战。

针对上述误差因素,本研究从系统设计层面采取了多重应对措施,在组件较多、光路与调整复杂的情况下,实现了良好的工作性能。首先,通过模块化集成设计将分光镜、反射镜等光学元件封装为紧凑的镜组机械件(如图 1 中灰色长方形所示),并通过仿真设计各镜组的初始空间位置,使系统在按设计位置装配后即具备良好的初始工作状态,显著降低了后续调整的复杂度。其次,在光学元件加工精度控制方面,所有关键镜片的角度加工公差严格控制在 10 角秒(0.048 mrad)以内,这一精度指标比系统允许的最小偏移半角度小一个数量级,从源头上保证了光路集成的初始对准精度。然后,在主动调整机制方面,系统配备了多维位移精密调整平台与镜片独立调整结构,这种多自由度微调能力使得 3 种波长光路能够完成精确对准,实际若按指定位置装配,则调整量较小。最后,系统采用了满量程标定程序来补偿残余误差。在系统初始化阶段,通

过在近似理想环境下对接收信号进行基准标定,建立 100% 透射率对应的电压参考值,从而有效补偿微小对准偏差等固定系统误差,保障系统在多镜多位移台复杂结构下的工作性能。

实验验证表明,尽管系统光学路径复杂且组件数量较多可能引入潜在不稳定因素,但通过上述模块化设计、高精度加工、主动调整和系统标定的综合策略,实现了稳定可靠的光路对准,且采用机械锁死机制固定调节后状态,能够在一次调校后长期稳定工作,为获得准确的测量结果提供了重要保障。这一系列措施的有效性在 4.1、4.2 节的测试结果中得到了验证。

4.4 系统优势与优化方向分析

本系统的核心优势在于其采用的“时谱复用合成”原理,解决了传统多基线测量系统在抗干扰、稳定性与紧凑性方面面临的挑战,构建了内在的误差感知与补偿能力。

“时复用”机制从根本上规避了光谱干扰。不同波长的激光信号并非同时发射,而是由可编程驱动电流源控制,在不同时隙依次选通工作。这种分时工作模式确保了在任何时刻,光路中仅存在单一波长的光信号,接收机也仅对该特定波长的信号进行采集与处理。因此,从时间维度上消除了不同波长信号间发生重叠或相互干扰的可能性。另外,若光学元件存在非理想特性(如反射率或透射率未达 100%),其时序隔离特性使得测量结果仅受单波长影响,且非理想信号在经过多次折返后已急剧衰减,例如绿光工作时,其在 475 nm 截止型分光镜上的反射较低(约 3%),经过 2 次反射后衰减至 0.09% 量级,从而削弱潜在残留影响。

“频复用”机制保障了多基线切换的稳定性。系统通过为不同基线分配特定工作波长,使得系统无需任何机械移动部件即可实现多种基线长度的稳定切换。所有光学元件在精密调整并固定后,基线关系即保持不变,有效克服了传统滑轨移动式系统在动态工作下存在的重复定位与定向不稳定问题,为实现长期稳定的高精度测量奠定了基础。

“合成”设计实现了系统的紧凑化。不同波长的激光在经过各自独立的基线路径传输后,最终在空间上被合成为一束光,由单一的接收机进

行接收与信号处理,从而避免了使用多接收机导致的系统体积较大的问题。

所构建的多基线系统在复杂环境下具备优势。一是系统性缓慢漂移,例如光学窗口因长期暴露于高污染、高湿度环境导致的污染衰减,或光源/探测器因长时间工作发生的性能退化,当前系统通过设置一条专用的基线通道,将测量信号的变化直接关联到系统固有衰减以修正透射比测量结果;二是局部突发干扰,如当某一基线因镜片偏移等局部因素导致信号异常时,其余未受影响的基线数据仍能提供可靠测量。通过数据融合算法,系统有效抑制了局部误差的传播。

在微型化与智能化方面,当前系统具备以下优化潜力。微型化方面,可通过进一步增加光路折返次数来实现,即在单位体积内“折叠”更长的光程。例如,通过设计更多反射次数的镜组,可以在保持基线长度不变的前提下,显著缩小系统的整体物理尺寸。同时,光学镜片的尺寸也可以减小,当前系统采用较大镜片主要是为了方便实验室阶段的调试与对准。智能化方面,现有系统通过五维调整平台进行初始对准,未来可引入机器视觉或基于反馈信号的自动对准算法,实现光路的自主优化与长期保持,从而降低维护需求,提升在无人值守环境下的适用性。

该系统的时谱复用与共接收机设计使其具有良好的扩展性,不仅限于气体透射比测量。其核心原理为通过不同波长的光在不同路径中的衰减来反演介质特性,可迁移至其他领域。例如,在液体分析领域,只需将激光波长调整至待测液体成分的特征吸收波段,并适配相应的样品池,该系统即可用于测量液体的透射比、浓度或浊度。这种波长和基线的灵活性为其在环境流体监测等领域的应用提供了坚实的技术桥梁。

5 结 论

本文设计并验证了一种基于时谱复用合成原理的多基线气体透射比测量系统,该系统通过

非机械移动的光学设计,解决了传统多基线系统在光路稳定性及设备紧凑性方面面临的长期挑战。在技术实现上,采用了集成化多波长激光光源与波长选择型光学镜组协同工作的方案,通过为不同波长激光分配独立的折返光路,在物理空间受限的条件下构建了多种有效测量基线,确保了各基线测量的独立性与稳定性,并采用光路合成与共用接收端设计大幅简化了系统结构,降低了制造成本与维护难度。

时谱复用合成多基线气体透射比测量系统在实验验证环节证明了紧凑型硬件设计的合理性与多基线数据融合处理算法的有效性。实验结果表明,在面对系统性衰减和局部光学组件偏差等复杂误差场景时,该系统展现出了良好的误差抑制能力,相较于单基线系统,在低透射比和高透射比的测试中分别将气体透射比示值误差从单基线系统的1.99%和25.58%降低至0.38%和7.23%以内,能够在复杂多变的实际应用环境中提供更稳定、更可靠的测量结果。本研究工作不仅提供了一种高性能、紧凑型气体透射比测量仪器的具体实现方案,并且为光电测量领域克服系统误差和局部影响提供了一种新颖且可扩展的技术路径。未来的研究工作可集中于系统的进一步微型化、智能化以及在不同气象条件下的长期现场部署验证。

作者贡献声明:

宋世豪:测量方法提出,测量实验设计,数据整理与分析,论文构思与初稿撰写;

杨卓异:测量实验数据分析与可视化呈现,论文构思与初稿撰写;

张海涛:论文构思,获得资源与项目管理,研究活动策划与执行;

孟阔:论文构思,数据管理,研究指导;

赵震欧:论文构思,调查研究,测量实验数据分析;

耿东明:获取资源与项目管理,测量实验数据分析。

参考文献:

[1] ABUD M M. A new transmissometer method that measures runway visibility across a short distance

[J]. *International Journal of Advances in Applied Sciences*, 2023, 12(3): 285.

[2] 夏冬,吴志权,谭浩波,等. 广东省能见度自动观

- 测系统资料评估分析与订正[J]. 气象科技, 2014, 42(1): 68-72.
- XIA D, WU ZH Q, TAN H B, *et al.* Analysis and correction of visibility measured by automatic observing system in Guangdong [J]. *Meteorological Science and Technology*, 2014, 42(1): 68-72. (in Chinese)
- [3] 刘承晓, 周建平, 翟振芳, 等. 2011-2015年安徽省高速公路低能见度变化特征[J]. 气象科技, 2017, 45(5): 858-863.
- LIU CH X, ZHOU J P, ZHAI ZH F, *et al.* Distributional characteristics of low visibility in expressways over Anhui Province [J]. *Meteorological Science and Technology*, 2017, 45(5): 858-863. (in Chinese)
- [4] 姚青, 张长春, 樊文雁, 等. 天津冬季大气能见度与空气污染的相互关系[J]. 气象科技, 2010, 38(6): 704-708.
- YAO Q, ZHANG CH CH, FAN W Y, *et al.* Correlation of horizontal visibility and air pollution concentration in winter in Tianjin [J]. *Meteorological Science and Technology*, 2010, 38(6): 704-708. (in Chinese)
- [5] 李浩, 孙学金, 单陈华, 等. 关于气象能见度理论与观测的讨论[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2013, 14(3): 297-302.
- LI H, SUN X J, SHAN CH H, *et al.* Basis theory and observation of meteorological visibility [J]. *Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2013, 14(3): 297-302. (in Chinese)
- [6] 王飞翔, 郭杰, 许方宇, 等. 不同海拔地区红外大气透过率的计算和测量[J]. 中国光学, 2019, 12(4): 843.
- WANG F X, GUO J, XU F Y, *et al.* Calculation and measurement of infrared atmospheric transmittance at different altitudes [J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(4): 843. (in Chinese)
- [7] 张世国, 方海涛, 汪玮, 等. 基于积分球分光与接收的透射式能见度测量系统[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(10): 1017003.
- ZHANG SH G, FANG H T, WANG W, *et al.* Transmission measurement system for visibility based on integrating sphere applied to light splitting and receiving [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(10): 1017003. (in Chinese)
- [8] LI M, WANG G J. A method combining mobile transmissometer and lidar for high precision measurement of visibility [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2024, 16(4): 6000110.
- [9] 杜传耀, 马舒庆, 杨玲, 等. 双光路能见度测量方法和试验[J]. 应用气象学报, 2014, 25(5): 610-617.
- DU CH Y, MA SH Q, YANG L, *et al.* Dual optical path visibility system measuring method and experiment [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2014, 25(5): 610-617. (in Chinese)
- [10] LIANG J, ZHANG G Y, ZHANG J, *et al.* Influence of transmissometers' light source spectral distribution in measuring visibility [J]. *Optics Communications*, 2021, 499: 127294.
- [11] 程绍荣, 魏全忠, 吕军. 一种实用型大气透射式能见度仪的研制[J]. 光电工程, 2011, 38(2): 144-150.
- CHENG SH R, WEI Q ZH, LÜ J. The development of a new atmosphere transmittance meter [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2011, 38(2): 144-150. (in Chinese)
- [12] 肖韶荣, 吴群勇, 周佳, 等. 透射式能见度仪动态范围扩展方法[J]. 应用光学, 2014, 35(4): 574-579.
- XIAO SH R, WU Q Y, ZHOU J, *et al.* Method to extend dynamic range of transmittance meter [J]. *Journal of Applied Optics*, 2014, 35(4): 574-579. (in Chinese)
- [13] YE S, BAI Y, LI Z, *et al.* Design of visibility detection system for tunnel based on transmission method [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2025, 46(10): 180607.
- [14] 王宗俐, 曹乃锋, 王春录. 一种激光能见度仪设计的新方法[J]. 激光与红外, 2012, 42(6): 629-632.
- WANG Z L, CAO N F, WANG CH L. New design of laser instrument for detecting the visibility [J]. *Laser & Infrared*, 2012, 42(6): 629-632. (in Chinese)
- [15] LI M, LIU S Y, MA Y Z, *et al.* A high-precision measuring system for atmospheric visibility based on a multi-reflection cell [J]. *Optical Review*, 2024, 31(1): 8-16.
- [16] 曹磊, 齐欢欢. 紫外可见分光光度计波长及透射比示值误差不确定度评定[J]. 品牌与标准化, 2025(6): 286-288.
- CAO L, QI H H. Evaluation of uncertainty in the

- indicated error of wavelength and transmittance for ultraviolet-visible spectrophotometers [J]. *Enterprise Standardization*, 2025 (6): 286-288. (in Chinese)
- [17] 陶威, 潘忠泉, 杨欣欣, 等. 基于多项式拟合的分光光度计透射比校正方法[J]. *化学分析计量*, 2025, 34(6): 122-125.
- TAO W, PAN ZH Q, YANG X X, *et al.* Transmission correction method of spectrophotometer based on polynomial fitting [J]. *Chemical Analysis and Meterage*, 2025, 34(6): 122-125. (in Chinese)
- [18] NEBULONI R. Empirical relationships between extinction coefficient and visibility in fog [J]. *Applied Optics*, 2005, 44(18): 3795-3804.
- [19] GRABNER M, KVICERA V. Multiple scattering in rain and fog on free-space optical links[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32 (3): 513-520.
- [20] BURAS R, MAYER B. Efficient unbiased variance reduction techniques for Monte Carlo simulations of radiative transfer in cloudy atmospheres: The solution[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2011, 112 (3): 434-447.
- [21] 曹韩晖, 陈洪耀, 张黎明, 等. 大气消光系数多基线透射式光电测量影响分析[J]. *光学学报*, 2024, 44(12): 1201013.
- CAO H H, CHEN H Y, ZHANG L M, *et al.* Impact analysis of multi-baseline transmission photoelectric measurement on atmospheric extinction coefficient[J]. *Acta Optica Sinica*, 2024, 44(12): 1201013. (in Chinese)
- [22] 庄子波, 台宏达, 蒋立辉. 一种基线长度改变的能见度测量和评价方法[J]. *光学学报*, 2016, 36 (2): 0201001.
- ZHUANG Z B, TAI H D, JIANG L H. Changing baseline lengths method of visibility measurement and evaluation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(2): 0201001. (in Chinese)
- [23] 台宏达, 庄子波, 蒋立辉, 等. 大气透过率的多点移动测量[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(8): 1894-1901.
- TAI H D, ZHUANG Z B, JIANG L H, *et al.* Multi-point mobile measurement of atmospheric transmittance[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24 (8): 1894-1901. (in Chinese)
- [24] LI M, JIANG L H, XIONG X L, *et al.* A novel variable baseline visibility detection system and its measurement method[J]. *Optical Review*, 2017, 24(5): 634-641.
- [25] LI M, XU J Z, XIONG X L, *et al.* Mobile multiple baselines visibility meter and its measurement approach [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, 47 (4): 401002.
- [26] FENG S, XIONG X L, MA Y Z, *et al.* Variable baseline atmospheric visibility measurement system [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57 (21): 210102.
- [27] CHEN L Y, SHUI Y Y, CHEN L B, *et al.* Multi-channel visibility distribution measurement via optical imaging [J]. *Photonics*, 2023, 10 (8): 945.
- [28] 周树道, 马忠良. 光路准直对长基线透射式能见度仪测量的影响[J]. *应用光学*, 2016, 37 (1): 87.
- ZHOU SH D, MA ZH L. Influence of optical path collimation on measurement of long baseline transmittance meter [J]. *Journal of Applied Optics*, 2016, 37(1): 87. (in Chinese)
- [29] 谢邦力, 王青梅, 李晶华. 单基线双光路透射表[C]. *中国气象学会2005年年会论文集*. 苏州, 2005: 245-255.
- XIE B L, WANG Q M, LI J H. Single-baseline dual-optical path transmittance meter [C]. *Proceedings of the Annual Conference of the Chinese Meteorological Society*, 2005: 245-255. (in Chinese)
- [30] 柳加旺. 双光路能见度测控系统设计[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2024.
- LIU J W. *Design of Dual Optical Path Visibility Measurement and Control System* [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2024. (in Chinese)
- [31] 李勃, 张瑛欣, 张帆, 等. 透射式能见度仪校准装置的研制及测量结果分析[J]. *应用光学*, 2023, 44(6): 1355-1361.
- LI Q, ZHANG Y X, ZHANG F, *et al.* Development of transmission visibility meter calibration device and analysis of measurement results [J]. *Journal of Applied Optics*, 2023, 44(6): 1355-1361. (in Chinese)
- [32] LIANG J, ZHANG G Y, ZHANG J, *et al.* Calibration method for attenuator piece used in calibrating a transmittance visibility meter [J]. *The Journal of Engineering*, 2019, 2019(23): 8614-8618.

- [33] 喻伟, 唐陶, 袁雪蒂. 提高透射式能见度仪测量精度和稳定性方法[C]. 第十八届中国航空测控技术年会论文集. 青岛, 2021: 193-196.
YU W, TANG T, YUAN X D. Methods of improving measurement accuracy and stability of transmission visibility meter [C]. *Proceedings of the 18th China Annual Conference on Aviation Measurement and Control Technology*, 2021: 193-196. (in Chinese)
- [34] 黄成栋, 李玮, 刘瑞良, 等. 透射式能见度仪校准方法研究[J]. 气象水文海洋仪器, 2018, 35(1): 17-19.
HUANG CH D, LI W, LIU R L, *et al.* Research on calibration methods of transmission visibility meter[J]. *Meteorological, Hydrological and Marine Instruments*, 2018, 35(1): 17-19. (in Chinese)

作者简介:



宋世豪(2001—),男,硕士研究生,主要从事大气光学方面的研究。E-mail: 15176015350@163.com

通讯作者:



张海涛(1973—),女,博士,教授,博士生导师,1995年于北京理工大学获得学士学位,2000年于北京理工大学获得博士学位,主要从事光学应用方面的研究。E-mail: zhanghaitao@mail.tsinghua.edu.cn