

基于 Fabry–Pérot 干涉仪的 CH₄点源探测方法研究与验证*

张强^{1)2) #} 李娟^{1) #} 畅晨光^{1)2) #} 王素凤^{1) #} 杨泽豪^{1) #} 冯玉涛^{1)†}

1) (中国科学院西安光学精密机械研究所, 光谱成像技术重点实验室, 西安 710119)

2) (中国科学院大学, 北京 100049)

摘要

本文围绕星载点源 CH₄探测需求,验证了一种基于 F-P 干涉仪的 CH₄遥感探测方法。构建了融合气体吸收特性与干涉调制机制的物理模型,系统分析关键影响因素,模拟不同 CH₄浓度条件下的光谱响应特性,并通过正演仿真评估系统对 CH₄吸收特征的调制能力。在此基础上,完成了 F-P 干涉仪光学性能测试及 CH₄浓度变化实验,并开展外场观测获取实测数据。实验结果表明,当 CH₄浓度变化 380ppb 时,探测信号的最大相对变化量可达 7.4%,探测系统能够有效响应 CH₄浓度变化。本研究验证了该探测方案在实现 CH₄点源遥感监测中的可行性与应用价值。

关键词: CH₄, 点源监测, 法布里—珀罗干涉仪, 浓度变化

基金: 国家自然科学基金(批准号: 42405143)、中国科学院西部青年学者项目(批准号: XAB 2016A07)、陕西省自然科学基金基础研究计划(批准号: 2019JQ-931)和中国科学院西部之光交叉团队项目(批准号: E1294301)资助的课题。

同等贡献作者。

† 通信作者. E-mail: fytciom@126.com

第一作者. E-mail: johnson_zhang1994@126.com

1 引言

甲烷(CH₄)作为第二大温室气体,其大气浓度自工业革命前约 720 ppb 增至约 1900 ppb。根据政府间气候变化专门委员会评估,以单位分子数而言,其温室效应比二氧化碳(CO₂)大 25 倍,且其寿命相对较短约 10 年,赋予 CH₄排放控制以短期缓解气候变暖的关键科学价值。全球 CH₄排放约 60%源于人类活动,主要包括石油天然气开采、煤炭生产、垃圾填埋、废水处理、水稻种植和畜牧业,这些排放源呈现显著的小尺度空间分布特征,表现为分散且局部聚集的设施

级点源^[1]。

目前，全球范围内的碳监测卫星多以大气温室气体柱总量的高精度监测与碳收支评估为核心目标，主要服务于全球碳循环研究、国家或区域碳盘点等宏观层面的应用需求。典型代表如欧洲空间局的 TROPOMI (Tropospheric Monitoring Instrument)^[2]、日本的 GOSAT (Greenhouse gases Observing Satellite)^[3]系列、德国的 CarbonSat (Carbon Monitoring Satellite)^[4]、中国的碳卫星 TanSat^[5]、以及高分五号^[6]等任务。这类任务搭载的温室气体监测载荷虽具备较高的光谱分辨率与柱总量反演精度，但空间分辨率普遍在公里级别，难以捕捉园区级排放点或识别尺度在数百米甚至更小的设施级排放源。设施级点源排放监测对系统分辨能力提出了更高要求，需要实现百米以下量级的空间分辨率，以有效捕获局地排放特征；同时，光谱分辨率需达到亚纳米量级，以分辨 CH₄的窄吸收结构，从而支撑浓度反演与排放定量分析。近年部分碳监测卫星 Carbon Mapper^[7]、EMIT (Earth surface Mineral dust source Investigation)^[8]、EnMAP (The Environmental Mapping and Analysis Program)^[9]、PRISMA (Precursore IperSpettrale della Missione Applicativa)^[10]等，开始向百米级空间分辨率迈进，旨在提升对小尺度、高动态排放源的观测能力，为获取更高的空间分辨率，这类载荷普遍在光谱维度上做出一定妥协，具有较低的光谱分辨率，光谱分辨率的降低会引入较大的反演误差，其反演精度往往低于上述大尺度碳盘点型任务。与此同时，国际上亦有面向点源排放监测的高分辨率温室气体遥感任务 GHGSat 系列，在空间分辨率 25 m 与光谱分辨率 0.1 nm 之间实现了较优平衡，能够对 CH₄点源突发排放事件具备良好的响应能力^[11-13]。相比之下，国内针对 CH₄点源遥感监测的研究仍处于起步阶段，相关技术体系与工程应用尚待完善。基于此，本研究聚焦面向点源排放的遥感观测技术，指标上重点关注空间分辨率达到百米量级以下、光谱分辨率达到亚纳米

量级，以有效分辨 CH_4 窄吸收特征，实现对 CH_4 点源浓度变化监测与精确定位。

CH_4 点源排放监测与快速识别已成为全球碳监测体系的重要发展方向。相较于传统面向柱总量统计的碳盘点型任务，点源探测遥感需在光谱分辨率与空间分辨率两个关键指标上同时具备优势，以实现排放源精准定位、排放强度定量反演及其时空动态变化的有效跟踪^[14]。基于法布里—珀罗（Fabry-Pérot, F-P）的 CH_4 气体点源探测技术兼顾高光谱分辨率及高空间分辨率，通过干涉圆环直接获取不同入射角度目标光谱信息，将多帧连续拍摄的目标在不同位置对应不同波长的光谱信息汇总获得目标光谱曲线，建立 CH_4 气体浓度与光谱曲线凹陷深度的关系；同时，体积小、质量轻，可卫星组网的优势使其能快速响应 CH_4 泄露等突发事件。

本文系统开展基于 F-P 干涉仪的 CH_4 气体点源探测原理与方法研究，构建探测系统模型并进行正演仿真，模拟分析不同 CH_4 浓度条件下的光谱响应曲线。在此基础上，通过搭建实验平台，开展干涉仪光学性能测试及 CH_4 浓度变化响应实验。结果表明，探测系统具有良好的 CH_4 浓度响应能力，验证了该点源 CH_4 遥感技术方案在异常排放事件监测中的可行性与有效性。

2 基于 F-P 干涉仪的 CH_4 点源探测原理及方法

2.1 F-P干涉原理

F-P干涉仪通常由两块透明平板组成，板内表面镀有反射膜，间隔元件固定后形成一个空气腔。当一束光从空气或其它介质中射入空气腔时，光线在两反射面之间多次反射和透射，多光束干涉后形成明暗条纹形式的图样，其原理如图1所示，平板内的入射角为 θ ，平板间腔内折射率为 n ，腔长为 h ，则相邻两反射光束的光程差 $\Delta=2nh\cos\theta$ ，相位差 $\varphi=4\pi nh\cos\theta/\lambda$ 。根据相关公式推算，其透射函数是关于波长 λ 、入射角 θ 的函数：

$$T_{FP}(\theta, \lambda) = \frac{1}{1 + F \sin^2(\phi/2)} \quad (1)$$

式中， ϕ 为相位差， F 为精细度， $F=4R/(1-R)^2$ ， R 为腔内反射率。在固定 R 的情况下，干涉强度仅随相位差 ϕ 变化；在固定 n 、 h 的情况下，干涉强度仅取决于光束倾角^[12]。

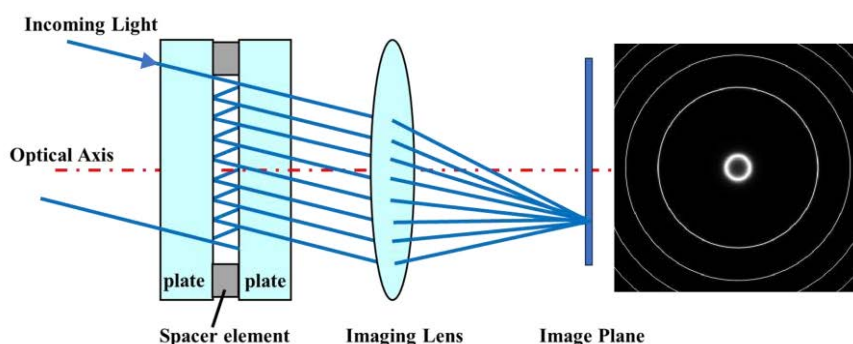


图1 F-P干涉仪原理图

Fig.1 Framework of F-P Interferometer

但在实际应用中需要考虑其存在的缺陷，主要包括平板反射表面面形误差和平行度误差。反射表面面形误差主要由加工误差、材料应力、温度变化等因素造成，F-P干涉仪的反射表面面形的峰谷值（Peak to valley, PV）、均方根值（RMS, Root Mean Square）出现偏差，这些偏差会影响干涉条纹的形成，导致干涉条纹展宽及透过率下降。腔体平行度误差通常由于两反射面之间的不完全平行造成两面间的距离不完全一致，这种光程差的变化可能导致不同部分的干涉光程不同，从而影响干涉条纹的位置和形态^[15-19]。

2.2 CH₄点源探测方法

CH₄点源探测方案是基于天底观测模式，利用固定腔F-P对地面像元的太阳反射散射光谱进行调制，根据采集到的调制信号变化即可反演出观测区域大气CH₄吸收强度变化信息，借助系统高分辨率的优势，进而可在均匀背景下识别出CH₄的排放源头，如图2所示，探测系统主要由望远系统、滤光片、F-P干涉仪、成像系统及探测器构成。由于F-P透射函数是与入射角 θ 有关，在成像探测中可

转化为探测器上的径向坐标函数，从而在二维探测器上形成的“光谱环”干涉图样。每个半径位置上，探测信号通过对经过滤波器与 F-P 调制后的光谱辐射函数进行波长方向上的积分获得，从而输出图谱合一的图像。

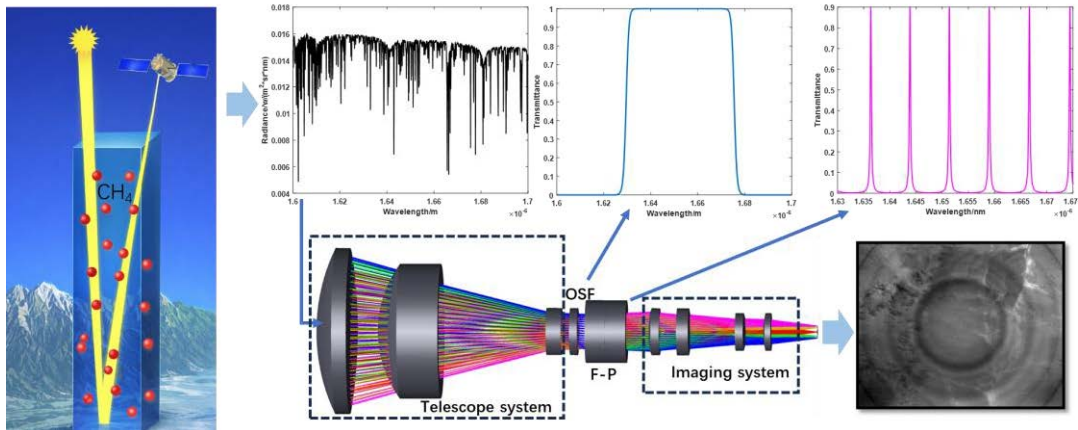


图2 CH₄气体点源方案示意图

Fig.2 Schematic diagram of the CH₄ point-source detection system

在星载推扫成像模式下，随着平台沿轨道运动，观测目标在探测器视场内逐行扫描，其辐射信息依次投影至不同空间像元。由于F-P干涉仪具有视场相关的光程差分布特性，其透射函数仅与入射角 θ 有关，可进一步表示为像元相对于视场中心的偏移函数。以像元(320,256)为例，其对应的F-P透射函数如图3(a)中圆形标记曲线所示，探测信号为F-P透射函数、滤光片透射函数与目标CH₄光谱的乘积积分结果。随着平台推扫，观测目标依次进入不同像元位置，其对应信号随入射角变化而发生调制。图3(a)中菱形与方形标记曲线分别表示目标位于(480,256)和(640,256)像元时的响应。目标扫描穿越整个视场后，可获得关于像元偏移的调制信号序列，如图3(b)所示。通过该过程可在空间维度上采集一组对应不同光程差的干涉图样，最终构建出具有“空间-光谱调制”的数据立方体，如图4所示。其中，X、Y轴为空间维，另一维为OPD表征的光谱维。在此基础上，若观测场景中存在多个CH₄点源（如图中菱形与五角星位置），其辐射信号在调制过程中将表现为光谱曲线的局部凹陷特征。通过建立凹陷深度与CH₄浓度之间的定量关系，可实现对点源排放强度的反演。

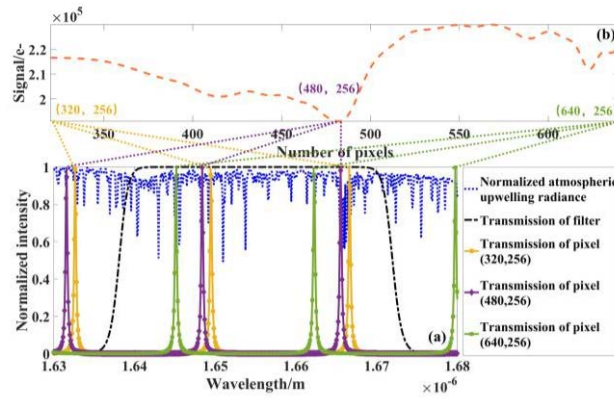


图3 基于F-P干涉仪CH₄气体点源探测原理图

Fig.3 Schematic diagram of CH₄ point source detection based on F-P interferometer

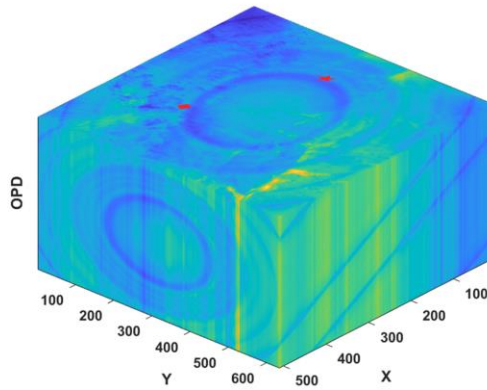


图4“空间-光谱调制”数据立方体

Fig.4 "Spatial-Spectral Modulation" Data Cube

3 基于 F-P 干涉仪的 CH₄ 点源探测模型及仿真分析

3.1 CH₄点源探测正演模型

正演模型用于数值化描述仪器接收目标辐射能量并形成观测信号的全过程。基于F-P干涉仪的CH₄点源探测模型综合考虑目标气体的大气辐射特性、传输路径中的吸收与散射过程，以及探测系统的光学响应特性等因素，输出与实际观测相对应的模拟数据，正演链路如图5所示，主要包括光谱辐射计算模块、滤波器响应函数、干涉仪透射函数等子模型，各环节协同描述气体吸收特征在干涉仪调制作用下的光谱演化过程，为系统性能评估提供理论基础。

根据探测原理方法，探测器上每个像元采集的光谱信号为地面目标反射散射光谱、滤光片光谱透射函数、F-P透射函数及探测器量子效率的乘积积分，计算模型如下：

$$S = \int L(\lambda) \cdot T_{OSF}(\lambda) \cdot T_{FP}(\theta, \lambda) \cdot Q(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

式中, $L(\lambda)$ 是关于波长 λ 的目标光谱辐射函数, $T_{OSF}(\lambda)$ 为滤波器的透射函数, $T_{FP}(\theta, \lambda)$ 为F-P的透射函数, $Q(\lambda)$ 为探测器量子效率。不同像元位置对应的光线入射角不同, 相应的F-P透射函数也不同, 因此, 探测器上每个采集信号为多个光谱通道的叠加谱信号。

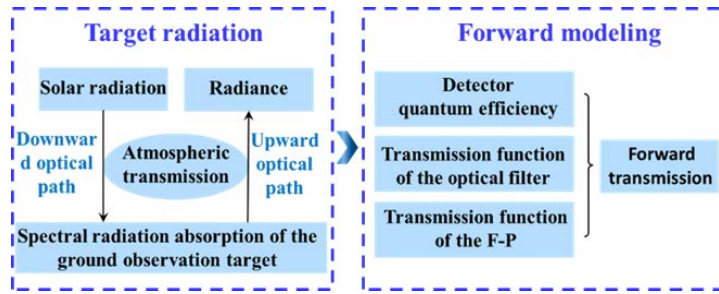


图 5 正演链路传输框图

Fig. 5 Forward modeling link transmission block diagram

在正演链路构建中, 光谱辐射函数的建立是整个模拟计算的基础。结合目标气体的吸收特性与大气传输路径, 本文利用逐线积分辐射传输模型 (Line-By-Line Radiative Transfer Model, LBLRTM) 计算 CH_4 在 1653 nm 强吸收峰附近的大气上行辐射谱, 如图 6 中点线所示。为提取特定 CH_4 吸收区域的辐射信息, 引入滤光片透射函数对波长范围进行约束, 其有效通带为 1630–1675 nm。F-P 干涉仪的透射函数按公式 (1) 建立, 其谱型如图 6 实线所示。在此基础上, 通过公式 (2) 对滤波后的辐射谱与 F-P 透射函数进行耦合计算, 得到探测器上的干涉图样, 如图 7 所示, 不同颜色表示沿波长积分后的信号强度分布^[20]。

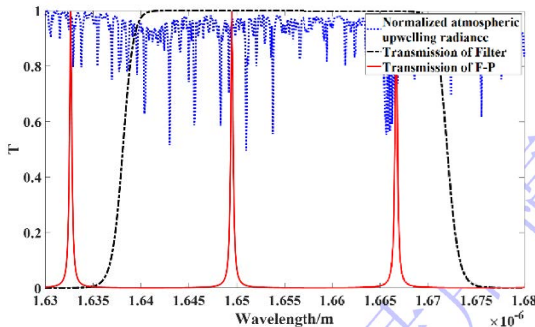


图 6 仪器响应函数模型

Fig.6 Instrument response function model

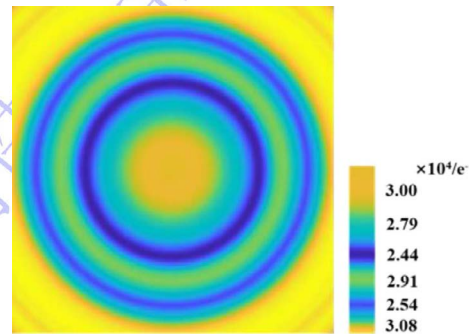


图 7 模拟输出探测器图样

Fig.7 Simulated Output Detector Pattern

3.2 关键参数分析

光谱分辨率、探测灵敏度和信噪比是评价 CH_4 探测系统性能的关键指标，直接影响气体识别、点源定位及浓度反演的准确性与可靠性。光谱分辨率表征系统分辨相邻吸收谱线的能力，高分辨率有助于提升多气体背景和低浓度条件下的 CH_4 吸收特征识别精度。探测灵敏度反映系统对 CH_4 浓度变化的响应能力，通常以单位浓度输出信号的变化量进行表征，其变化幅度越大，系统对浓度变化的响应越敏感。信噪比决定了有效信号从噪声背景中分离的能力，是保障复杂背景条件下稳定探测的关键因素。F-P 干涉仪是探测系统的关键部件，上述性能指标的实现与优化在很大程度上依赖于 F-P 透射函数的峰值位置选择及其谱形特性，合理设计透射函数的透射峰位置与形态参数，有助于在光谱分辨率、探测灵敏度与信噪比之间取得平衡，从而整体提升 CH_4 探测系统的综合性能。

在 F-P 干涉仪中，腔长是决定其光谱特性的关键参数，直接影响自由光谱范围 (Free Spectral Range, FSR) 的大小。通过调节腔长可实现对 FSR 的有效控制，从而决定干涉仪在特定探测波段内的工作模式。当 FSR 大于探测波段宽度时，波段内仅存在单一透射峰，系统处于单模工作状态，透射峰随视场变化在波长维上连续移动，实现对目标波段的逐步扫描；当 FSR 小于探测波段宽度时，波段内存在多个透射峰，系统处于多模工作状态，各透射峰随视场变化同步扫描，实现对波段信息的并行获取。

本文通过选取不同腔长参数，使系统在目标波段内分别呈现单模、双模及多模等工作状态。假设各模式均以 1630 nm 为波长扫描起点，在腔体反射率为 95% 、面形精度为 $\text{PV}=\lambda/120$ 、 $\text{RMS}=\lambda/600@ \lambda=633\text{nm}$ 、平行度为 $0.05''$ 的条件下，系统 F 数为 4。在此参数设置下，不同工作模式对应的自由光谱范围及腔长如表 1 所示。

表 1 各模式对应自由光谱范围及腔长
Table 1 Free Spectral Range and Cavity Length for Each Mode

模式	自由光谱范围/nm	腔长/mm
单模	45.00	0.03016
双模	22.50	0.06032
三模	15.00	0.09048
四模	11.25	0.12064
五模	9.00	0.15080
六模	7.50	0.18096
七模	6.43	0.21112
八模	5.63	0.24128

通过正演模型仿真分析,不同工作模式下探测器获得的干涉图样如图 8 所示,单位均为 e^- , 信号绝对变化量曲线如图 9 (a) 所示, 信噪比曲线如图 9 (b) 所示, 不同模式下的信号的绝对变化量均值、探测灵敏度均值、信噪比均值及光谱分辨率如表 2 所示。分析表明,在所设参数条件下,五模工作状态下的信号响应最为显著,探测灵敏度均值为 $0.533e^-/ppb$, 表现出最优的探测性能。

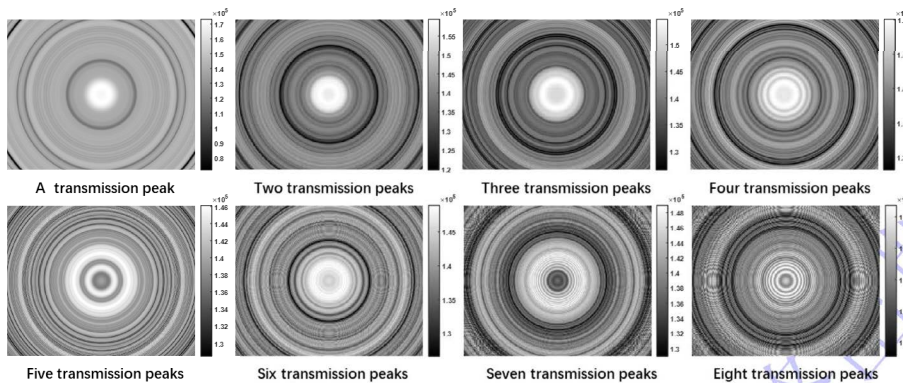


图8 不同腔长下探测器干涉图样

Fig.8 Interference patterns recorded by the detector for varying cavity lengths.

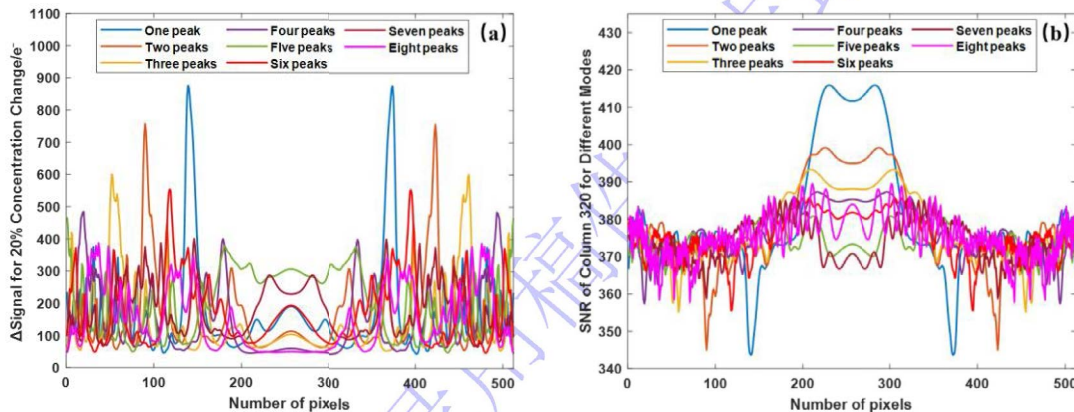


图9 不同模式下信号绝对变化量曲线及信噪比曲线 (a) 信号绝对变化量曲线; (b) 信噪比曲线

Fig.9 Absolute Signal Change and Signal-to-Noise Ratio Curves under Different Modes(a)
Absolute Signal Change Curve; (b) Signal-to-Noise Ratio Curve

表 2 不同模式下系统性能

Table 2 System Performance under Different Modes

模式	绝对变化量均值/e-	探测灵敏度均值/ (e-/ppb)	信噪比均值	光谱分辨率/nm
单模	171.395	0.451	380.090	0.807
双模	162.526	0.427	378.048	0.404
三模	146.620	0.385	377.498	0.269
四模	145.252	0.382	376.631	0.202
五模	202.825	0.533	374.387	0.161
六模	172.160	0.453	375.695	0.135
七模	181.348	0.477	374.111	0.115
八模	148.784	0.391	375.616	0.101

透射函数的形态特征对吸收特征的调制能力具有决定性影响。谱线形态不仅体现在光谱分辨率，还包括峰值透过率，两者共同决定系统在背景干扰下对 CH_4 吸收特征的提取能力，从而影响对浓度变化的响应灵敏度与反演准确性。光谱分辨率由 F-P 干涉仪的自由光谱范围与精细度共同决定，其中 FSR 主要由腔长控制，前述已经分析，而精细度则与腔面反射率、面形精度及平行度等参数密切相关，较高精细度对应更窄的谱线宽度，有利于提升对 CH_4 吸收峰的分辨能力。

腔面反射率是决定 F-P 干涉仪干涉特性与光谱性能的关键参数之一。相对而言，面形精度与平行度数值越高，越有利于获得理想的干涉性能。反射率不仅影响干涉条纹的形状与对比度，还直接制约系统的信噪比。结合前述腔长对自由光谱范围及工作模式的影响，以五模模式下腔长为基础，分析不同反射率 $R=90\% \sim 99\%$ 对光谱分辨率、信号灵敏度及信噪比的影响，通过正演模型，不同反射率下探测器获得的干涉图样如图 10 所示，单位均为 e-；浓度变化 20% 时，信号绝对变化量曲线及信噪比曲线如图 11 所示，不同反射率下的信号的绝对变化量均值、探测灵敏度均值、信噪比均值及光谱分辨率如表 3 所示。

上述分析结果表明，当反射率增加时，光谱分辨率有所提升，但探测灵敏度下降，即信号对浓度变化的响应减小，信噪比降低。为了综合评估系统在分辨率和信噪比之间的性能，引入变化信噪比 ΔSNR ，定义为信号在浓度变化一定比例

时的绝对变化量与噪声的比值。然后，用变化信噪比与光谱分辨率的比值作为综合性能指标，用于表征系统在分辨率与信噪能力之间的权衡。通过对不同反射率条件下该指标进行比较，并选取比值最大的反射率，可初步确定兼顾光谱分辨率和浓度变化响应的最优设计。图 12 (a) 结果显示，最优反射率约为 97%。进一步对比 97%~98%反射率下的评价指标，图 12 (b) 最终确定最优反射率为 97.5%。

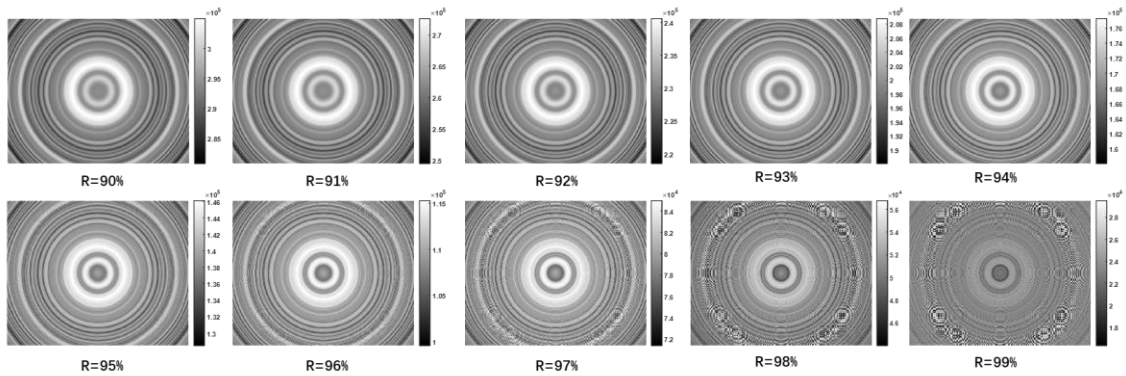


图10 不同反射率下探测器干涉图样

Fig.10 Detector Interference Patterns at Different Reflectivities

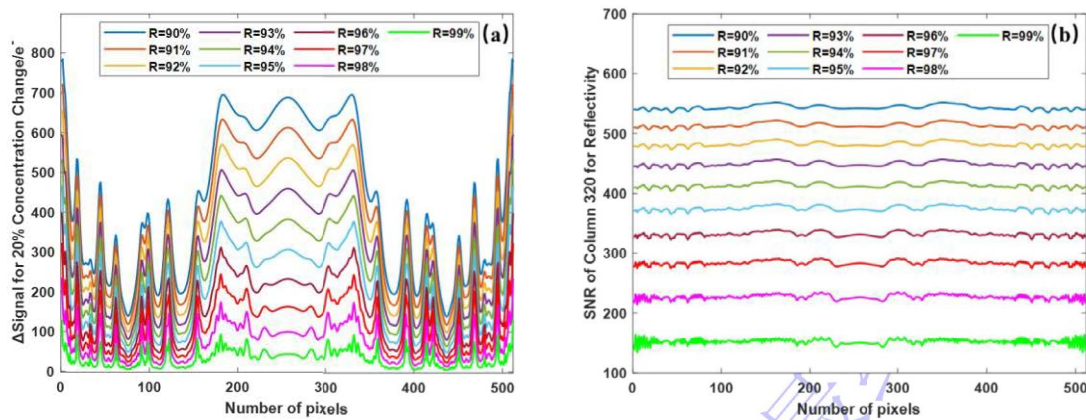


图11 不同反射率下信号绝对变化量曲线及信噪比曲线 (a) 信号绝对变化量曲线; (b) 信噪比曲线

Fig.11 Absolute Signal Change and Signal-to-Noise Ratio Curves for Different Reflectivities (a) Absolute Signal Change Curve; (b) Signal-to-Noise Ratio Curve

表 3 不同反射率下系统性能

Table 3 System Performance at Different Reflectivities

反射率	信号绝对变化均值/e-	探测灵敏度均值/ (e-/ppb)	信噪比均值	光谱分辨率/nm
90%	431.590	1.135	283.841	0.311
91%	384.966	1.013	278.624	0.281
92%	338.722	0.891	273.317	0.250
93%	292.906	0.770	267.914	0.220
94%	247.579	0.651	262.411	0.191
95%	202.825	0.533	256.802	0.163

96%	158.761	0.417	251.079	0.136
97%	115.553	0.304	245.236	0.112
98%	73.458	0.193	239.264	0.090
99%	32.975	0.086	233.154	0.075

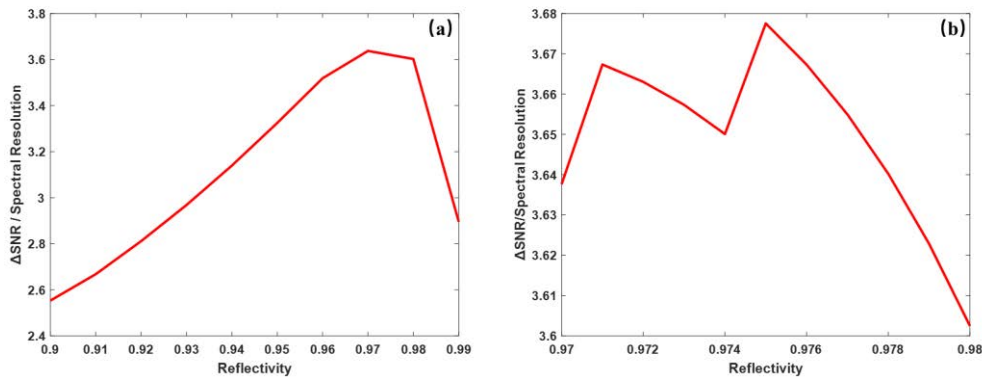


图12 不同反射率下变化信噪比与光谱分辨率比值 (a) 反射率0.9~0.99; (b) 反射率0.97~0.98
Fig.12 Ratio of Δ SNR to Spectral Resolution for Different Reflectivities: (a) Reflectivity 0.90~0.99; (b) Reflectivity 0.97~0.98

通过影响因素分析，不同腔长条件下信号响应差异明显，表明腔长变化对系统响应具有主导影响，是影响探测性能的关键因素之一。通过改变反射率虽可增强系统的光谱分辨能力，但会同时降低峰值透过率，导致有效信号强度衰减，从而对系统信噪比产生不利影响。因此，在干涉仪参数设计中需在光谱分辨率提升与信号强度保持之间进行合理权衡，以实现 CH_4 探测系统综合性能的最优配置。

3.3 CH_4 浓度变化仿真

根据 3.2 节 CH_4 气体点源探测系统方案关键参数仿真分析后，系统各组件参数如表 4 所示，结合 3.1 正演模型进行仿真分析后，得到如图 13 所示的干涉图，在干涉图上选取第 256 行（图 13 框线区域）作为输出信号，浓度变化后对应信号相对变化量如图 14 所示，结果表明， CH_4 浓度变化 20%，信号相对变化量的范围为 0.02%~0.64%，说明仪器对 CH_4 浓度变化具有响应能力。

表 4 仿真系统各组件参数
Table 4 Parameters of Each Component in the Simulated System

参数	量值
滤光片通带 /nm	1630~1675
F-P 光谱分辨率/nm	0.1
F-P 腔长/mm	0.1508
F-P 反射率	97.5%
F-P 平板面形精度	$PV=\lambda/120$ 、 $RMS=\lambda/600@ \lambda=633\text{nm}$

F-P 腔体平行度	0.05"
成像镜焦距 f/mm	49
像元尺寸/ μm	20
像元数	640*512

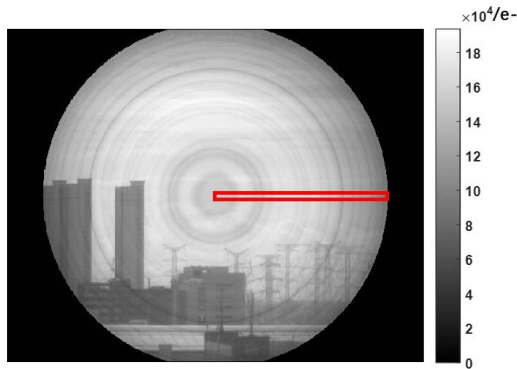


图13 探测器仿真图

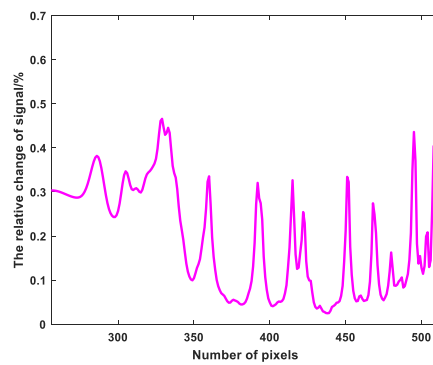


图14 CH₄浓度变化20%信号相对变化量

Fig.13 Simulated Pattern of the Detector Fig.14 Relative change of signal with 20% CH₄ Change

4 实验验证

4.1 F-P干涉仪性能测试

基于现有实验条件开展 CH₄气体探测实验，旨在对技术的可行性与有效性进行验证。实验采用实验室已有的 F-P 干涉仪作为核心光学器件，在既定系统参数条件下获取气体吸收信号，并对探测结果进行分析与评估。F-P 干涉仪的光学性能在点源 CH₄气体探测中起着关键作用，直接影响系统的光谱分辨率、信噪比以及对气体吸收特征的识别能力。为确保所采用干涉仪在实际应用中具备足够的光谱分辨率与稳定性，有必要对其核心光学性能参数进行系统测试与评估。用于 CH₄ 气体实验的 F-P 干涉仪如图 15 所示，其参数为腔长 0.09918mm，反射率为 95%，平板面形精度 PV= $\lambda/60$ 、RMS= $\lambda/550$ @ $\lambda=633\text{nm}$ 。



图15 用于CH₄探测的F-P干涉仪

Fig.15 F-P interferometer for CH₄ detection

在目标探测波段内，分别采用可调谐激光器与氙灯作为光源开展F-P干涉仪性能测试。在激光器测试中，选取1630~1670 nm波段，步长为5 nm，曝光时间设置为30 ms，在氙灯测试条件下，曝光时间设为1 s，各波长下探测器获取的干涉图如图16所示。基于霍夫变换圆检测方法确定干涉环圆心，选取中间行信号数据进行分析，其结果如图17所示。

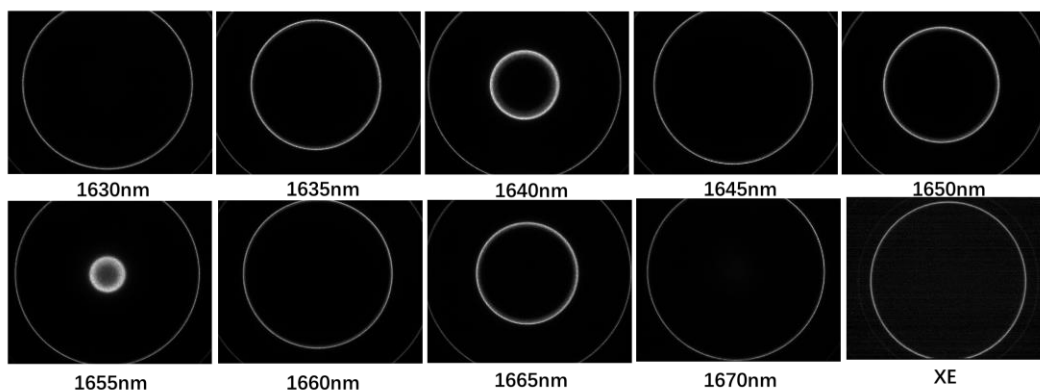


图16 不同波长下探测器采集干涉图样

Fig.16 Interference Patterns Acquired by the Detector at Different Wavelengths

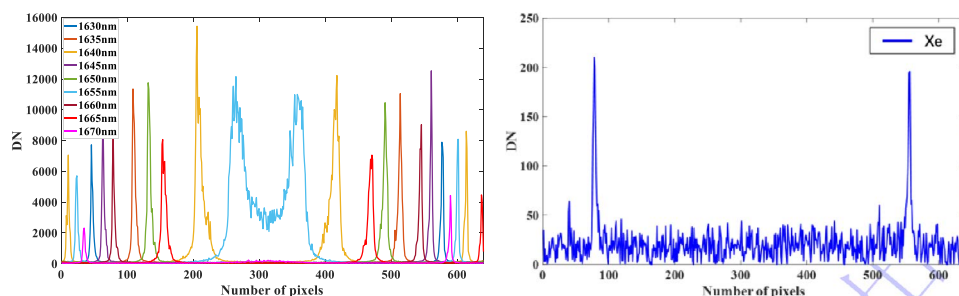


图17 不同波长下探测器干涉信号

Fig.17 Detector Interference Signals at Different Wavelengths

对比度是表征F-P干涉仪干涉条纹清晰度及光谱分辨能力的重要参数，通常定义为透射峰值与谷值之间的强度比。较高的对比度有助于增强干涉条纹的可识别性，从而提升CH₄气体吸收特征的分辨能力。基于上述测试数据，计算得到各波长条件下的干涉圆环对比度，其结果如表5所示；在获得干涉信号的基础上，进一步对干涉谱线进行拟合分析，可得其光谱分辨率约为 0.45 nm。结果表明，在激光器与氙灯两种光源条件下，干涉仪均能够产生清晰且高对比度的干涉图像，体现出良好的光学性能与系统稳定性，为后续CH₄气体浓度变化探测提供了

可靠的实验基础。

表 5 各波长下干涉圆环对比度
Table 5 Interference Fringe Contrast at Different Wavelengths

波长/nm	量值
1630	343.4545
1635	358.0455
1640	314.8367
1645	350.64
1650	355.5435
1655	353.25
1660	347.4231
1665	322.8
1670	340.9231
Xe	210

4.2 CH₄浓度变化实验

本论文聚焦于 CH₄点源探测技术有效性验证，探测系统主要由滤光片、F-P干涉仪、成像镜及探测器构成，其示意图如图 18 所示。

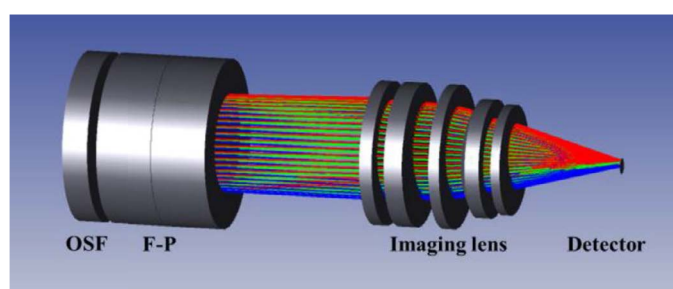


图 18 基于 F-P 干涉仪 CH₄ 气体点源探测系统
Fig.18 System of CH₄ point source detection based on F-P interferometer

基于F-P干涉仪的CH₄气体探测实验测试装置主要由钨灯、硫酸纸、集气袋(内含CH₄及N₂)、滤光片、F-P干涉仪、成像镜及探测器构成。测试光路图如图19所示。基于该技术属于宽谱吸收光谱探测机制，本实验采用卤素钨灯作为连续谱光源，以模拟太阳辐射特性。光源发出的光束经过具有高漫反射性能的硫酸纸进行均匀化处理，形成空间均匀性良好的扩展光源，用于后续吸收实验。混合气体室采用定比例配置的CH₄/N₂混合气袋结构，通过理想气体状态方程，结合气体袋的已知体积、温度与压力参数，计算CH₄物质的量，并进一步推算其在气室中的浓度分布，从而实现对实际大气中CH₄浓度变化的准确模拟。在光谱探测环节，CH₄

分子在其特征吸收波段内对入射光产生吸收作用，形成典型的吸收谱。该吸收谱经过F-P干涉仪时，受到其透射函数调制，叠加形成干涉信号，调制后的光强分布再经成像透镜组聚焦耦合至焦平面。

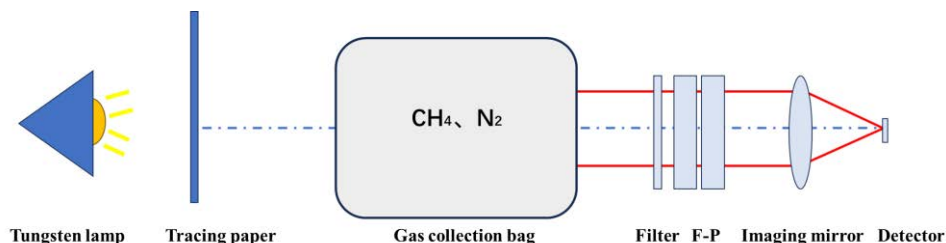


图 19 实验光路图

Fig.19 Experimental Optical Path Diagram

搭建的基于 F-P 干涉仪的 CH₄气体探测实验系统如图 20 所示。系统主要由光源模块、气体吸收模块、F-P 模块及探测采集模块组成，光源为型号 HL6420 卤素钨灯，滤光片透射曲线如图 21 (a) 所示、F-P 干涉仪参数见 4.1 节、成像镜焦距 43.37mm，视场角±5°，探测器为滨松生产的型号为 C12741-03 的 InGaAs 相机，像元数为 640×512，像元尺寸为 20μm，量子效率曲线如图 21 (b) 所示。

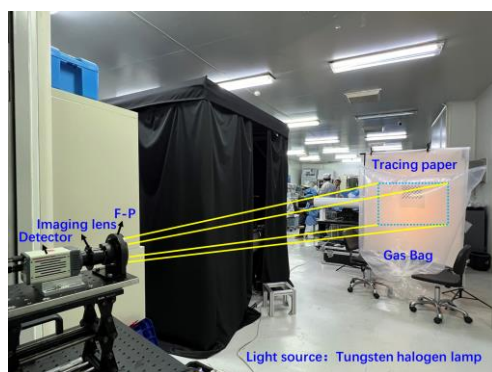


图 20 实验测试

Fig.20 Experimental Testing

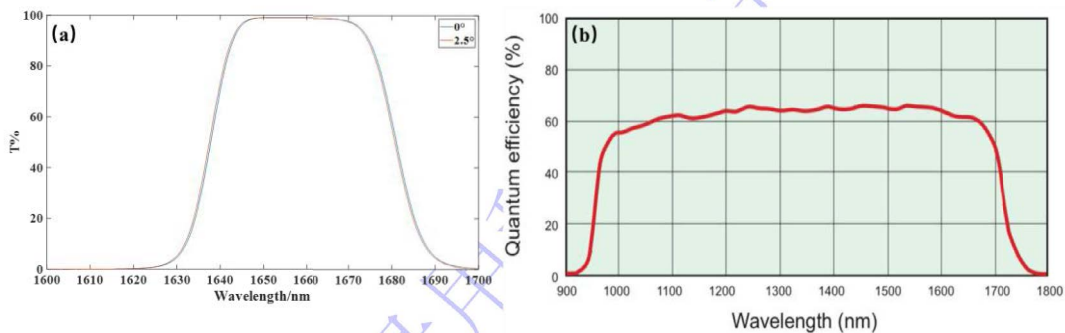


图 21 滤光片透过率曲线及探测器量子效率曲线 (a) 滤光片透过率曲线；(b) 探测器量子效率曲线

Figure 21 Transmittance curve of the filter and quantum efficiency curve of the detector(a) filter transmittance curve;(b) detector quantum efficiency curve.

实验中选取两种不同浓度的 CH_4 气体进行测试, 浓度分别为 1900 ppb 和 2280 ppb。在不同浓度条件下获取的探测器干涉原始图像如图 22 (a)、(b) 和 (c) 所示。为了进行信号分析, 选取干涉图的第 278 行作为输出信号, 分析有无 CH_4 气袋的信号相对变化量和浓度变化 20% 的信号相对变化量, 分别如图 23 (a)、(b) 所示, 实验结果表明, CH_4 浓度变化 20%, 信号的相对变化量在 2.2%~7.4% 之间。

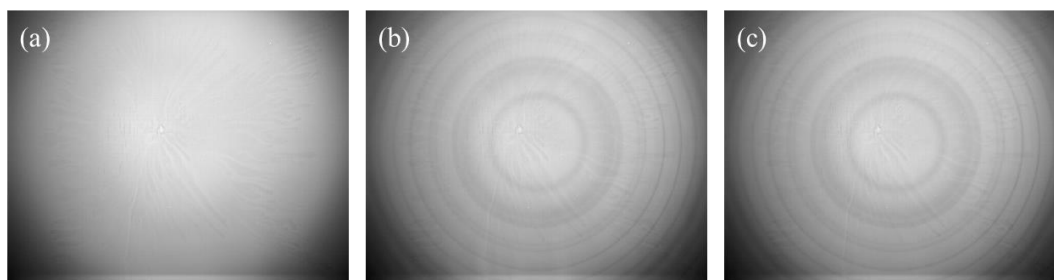


图 22 实验测试探测器干涉图 (a) 无 CH_4 气袋; (b) CH_4 气体浓度 1900ppb; (c) CH_4 气体浓度 2280ppb

Fig.22 Interference Pattern of the Detector in Experimental Test:(a) Without CH_4 Gas bag;(b) CH_4 Gas Concentration of 1900 ppb;(c) CH_4 Gas Concentration of 2280 ppb

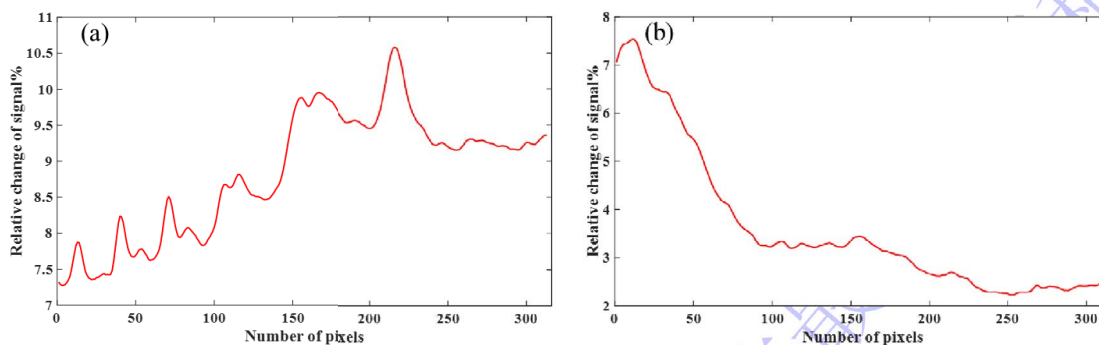


图 23 探测器上信号相对变化量 (a) 有无 CH_4 气袋; (b) CH_4 气体浓度浓度变化 380ppb
Fig.23 Relative change of signal on the Detector: (a) With and without CH_4 gas bag;(b) 380 ppb change in CH_4 gas concentration

此外, 基于搭建的实验测试系统开展外景实时观测实验, 获取了背景与干涉圆环的叠加成像图样, 如图 24 所示, 图 24 (a) 为纯天空测试, 图 24 (b) 为建筑物测试。

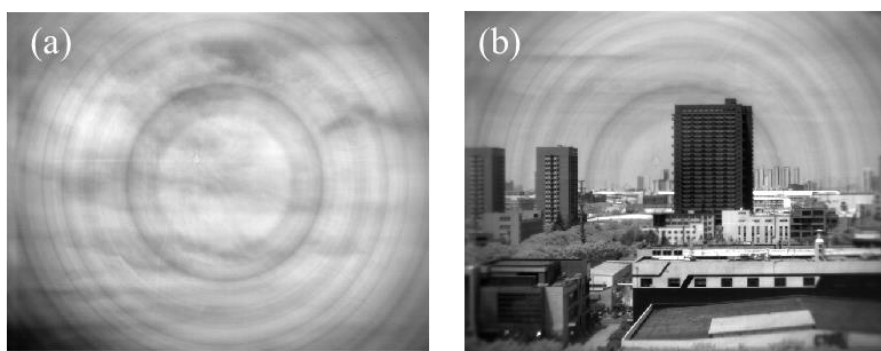


图 24 外景观测实验探测器图样 (a) 天空; (b) 建筑物

Fig. 24 Detector Image of Outdoor Observation Experiment: (a) Sky;(b) Building

通过对比实验室测试结果与纯天空外场测试结果发现, 谱线特征整体具有良好一致性。如图 25 所示, 标记出的吸收线对应于探测波段的 CH_4 气体的特征吸收, 而其余未标记吸收结构主要来源于 CO_2 、水汽等大气组分的吸收贡献, 该结果表明系统能够有效分辨目标气体与背景大气成分的光谱特征。

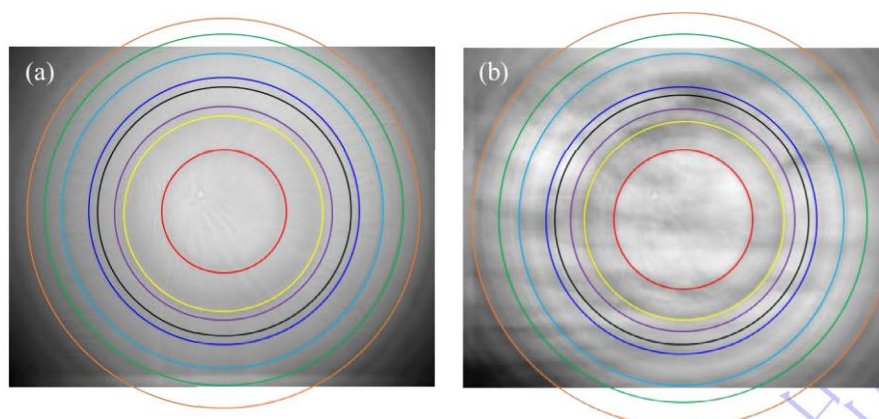


图 25 实验室测试与纯天空外场测试结果对比 (a) 实验室测试结果; (b) 外场测试结果

Fig. 25 Comparison between laboratory test results and pure sky field test results: (a) Laboratory test result;(b) Field test result

对于点源监测任务而言, 核心目标在于实现高空间分辨率下的快速定位与异常识别。在典型油气设施泄漏或异常排放事件中, 对应的局部浓度增强可达数百 ppb 甚至更高, 呈现出显著的高对比度空间分布特征, 本文的方法对相应浓度扰动表现出良好的响应能力, 能够有效识别异常增强信号。在空间分辨能力方面, 通过望远系统与后端成像参数的合理匹配, 在典型轨道高度条件下系统可实现约 25~50 m 的空间分辨率, 具备对点源尺度 CH_4 泄漏进行精细定位的能力。在光谱分辨能力方面, 实验结果表明, 系统能够有效分辨 CH_4 的特征吸收谱线, 为反

演提供支撑。综上，系统在浓度响应、空间分辨及光谱分辨等方面均具备支撑能力，验证了其在点源监测及工程化应用中的可行性。

5 结 论

本文围绕基于 F-P 干涉仪的 CH₄ 点源探测技术，阐述了探测原理与方法，并开展了系统建模、关键参数分析、浓度变化仿真及实验验证。研究表明，F-P 干涉仪的光学参数及透射函数特性对 CH₄ 探测性能具有系统性影响，其设计需依据工作模式对腔长进行合理选取，使透射峰与 CH₄ 关键吸收特征实现有效匹配，同时在光谱分辨率与信号强度之间取得合理平衡。仿真与实验验证进一步显示，通过优化参数配置，可在保持信号强度的前提下实现高分辨率调制，使系统能够对 CH₄ 浓度变化作出有效响应。本研究为星载 CH₄ 点源探测系统的参数优化与工程实现提供了理论依据和实践指导，并支撑了其在异常排放事件监测中的应用能力。

参考文献

- [1] Liu S H, Li X Y, Cao X F, Zhang X Y 2022 *Remote Sens. Technol. Appl.* **37** 436 (in Chinese) [刘双慧, 李小英, 曹西凤, 张新苑 2022 遥感技术与应用 **37** 436]
- [2] De Vries J, Laan E C, Hoogeveen R W M, Jongma R T, Aben I, Visser H, Boslooper E, Saari H, Dobber M, Veefkind P, Kleipool Q, Levelt P F 2007 *Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites XI* Prague, Czech Republic, September 17–20, 2007 p85
- [3] Suto H, Kuze A, Shiomi K, Imai H, Kataoka F, Kikuchi N, Knuteson R O, Butz A, Haun M, Buijs H 2021 *Atmos. Meas. Tech.* **14** 2013
- [4] Buchwitz M, Reuter M, Bovensmann H, Pillai D, Heymann J, Schneising O, Rozanov V, Krings T, Burrows J P, Boesch H, Gerbig C, Meijer Y, Löscher A 2013

Atmos. Meas. Tech. **6** 3477

- [5] Yang D X, Liu Y, Cai Z N, Chen X, Yao L, Lu D R 2018 *Adv. Atmos. Sci.* **35** 621
- [6] Chen L F, Shang H Z, Fan M, Tao J H, Hu S L T 2021 *J. Remote Sens.* **25** 1917 (in Chinese) [陈良富, 尚华哲, 范萌, 陶金花, 胡斯勒图 2021 遥感学报 **25** 1917]
- [7] Duren R, Cusworth D, Ayasse A, Howell K, Diamond A, Scarpelli T, Kim J, O'Neill K, Lai-Norling J, Thorpe A, Zandbergen S R, Shaw L, Keremedjiev M, Guido J, Giuliano P, Goldstein M, Nallapu R, Barentsen G, Thompson D R, Roth K, Jensen D, Eastwood M, Reuland F, Adams T, Brandt A, Kort E A, Mason J, Green R O 2025 *Atmos. Meas. Tech.* **18** 6933
- [8] Bradley C L, Thingvold E, Moore L B, Haag J M, Raouf N A, Mouroulis P, Green R O 2020 *Imaging Spectrometry XXIV: Applications, Sensors, and Processing* San Diego, August 24–27, 2020 p1150402
- [9] Guanter L, Kaufmann H, Segl K, Foerster S, Rogass C, Chabrillat S, Kuester T, Hollstein A, Rossner G, Chlebek C, Straif C, Fischer S, Schrader S, Storch T, Heiden U, Mueller A, Bachmann M, Mühle H, Müller R, Habermeyer M 2015 *Remote Sens.* **7** 8830
- [10] Loizzo R, Guarini R, Longo F, Scopa T, Formaro R, Facchinetti C 2018 *PRISMA: The Italian Hyperspectral Mission Proc. IGARSS 2018 Valencia*, Spain, July 22–27, 2018 p175
- [11] Ligorì M, Bradbury L, Spina R, Zee R E, Germain S 2019 *GHGSat Constellation: The Future of Monitoring Greenhouse Gas Emissions* Logan, UT, August 3–8, 2019 p1
- [12] Varon D J, Jacob D J, McKeever J, Jervis D, Durak B O A, Xia Y, Huang Y 2018 *Atmos. Meas. Tech.* **11** 5673

- [13] MacLean J P W, Girard M, Jervis D, Marshall D, McKeever J, Ramier A, Strupler M, Tarrant E, Young D 2024 *Atmos. Meas. Tech.* **17** 863
- [14] Jervis D, McKeever J, Durak B O A, Sloan J J, Gains D, Varon D J, Ramier A, Strupler M, Tarrant E 2021 *Atmos. Meas. Tech.* **14** 2127
- [15] Wang W G 1988 *Gan She Guang Pu Yi* (Beijing: Yuhang Press) p75 (in Chinese)
- [王文桂 1988 干涉光谱仪 (北京: 宇航出版社) p75]
- [16] Hays P B, Roble R G 1971 *Appl. Opt.* **10** 193
- [17] Hernandez G 1970 *Appl. Opt.* **9** 1591
- [18] Lotsch H K V 2010 *Ann. Phys.* **471** 7
- [19] Hernandez G 1966 *Appl. Opt.* **5** 1745
- [20] Zhang Q, Bai C X, Fu D, Li J, Chang C G, Zhao H X, Wang S F, Feng Y T 2024 *Acta Photonica Sin.* **53** 183 (in Chinese) [张强, 柏财勋, 傅頔, 李娟, 畅晨光, 赵珩翔, 王素凤, 冯玉涛 2024 光子学报 **53** 183]

录用稿件, 非最终出版稿

Investigation and Experimental Validation of a CH₄ Point-Source Detection Method Based on a Fabry–Pérot Interferometer*

ZHANG Qiang^{1)2)#} LI Juan^{1)#} CHANG Chenguang^{1)2)#} WANG Sufeng^{1)#} YANG Zehao^{1)#}
FENG Yutao^{1)†}

1) (Key Laboratory of Spectral Imaging Technology, Xi'an Institute of Optics Precision Mechanic
of Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

2) (University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract

This study validates a methane remote sensing detection scheme based on a Fabry–Pérot (F–P) interferometer, aimed at meeting the requirements for spaceborne methane point-source detection. As an important greenhouse gas, methane plays a key role in global climate change, and accurate monitoring of its localized emissions is of great significance for environmental governance and climate change mitigation. This work systematically evaluates the feasibility of the proposed scheme, providing theoretical and technical support for the development and application of spaceborne methane detection systems.

A combined approach of theoretical modeling, numerical simulation, and experimental validation is employed. First, a physical model integrating methane absorption characteristics and F–P interferometric modulation mechanisms is established to describe the coupling relationship between methane spectral absorption and interferometric transmission, enabling simulation of system spectral responses under varying methane concentration conditions. Based on this model, key parameters such as cavity length and reflectivity are analyzed through numerical simulations to optimize the system's modulation performance for methane absorption features.

The experimental validation consists of three parts: interferometer performance characterization, methane concentration variation experiments, and outdoor imaging experiments. The optical performance of the F–P interferometer is first evaluated, focusing on fringe contrast and spectral resolution to verify that the core component meets system

design requirements. Methane concentration variation experiments are then conducted by adjusting methane concentration in gas bags to obtain system responses and evaluate its sensitivity to concentration changes. Finally, outdoor imaging experiments are carried out under real environmental conditions to verify system performance in practical scenarios.

The results show that the proposed model effectively captures the interaction mechanism between methane absorption and F–P interferometric modulation. System performance is significantly influenced by interferometer parameters and modulation characteristics. A trade-off between spectral resolution and signal intensity must be considered in the design, while ensuring accurate alignment between transmission peaks and methane absorption features. Simulation results indicate that parameter optimization enables effective modulation while maintaining signal strength, and accurately reflects the system response to methane concentration variations.

Experimental results show that the F–P interferometer exhibits excellent stability and optical performance, with high fringe contrast and good spectral resolution, providing a stable and reliable modulation signal for the detection system. The methane concentration variation experiments demonstrate good system sensitivity: when the methane concentration changes by 380 ppb, the maximum relative change in the system output signal reaches 7.4%. Further comparison between outdoor imaging results and laboratory measurements shows strong consistency in the retrieved spectral features. The characteristic absorption features of methane are clearly identifiable, while additional absorption structures are primarily attributed to overlapping absorption from carbon dioxide and water vapor in the atmosphere. These results indicate that the system can effectively distinguish target gas signatures from background atmospheric components, providing reliable support for subsequent retrieval and quantitative analysis.

For point-source monitoring applications, methane concentration enhancements in typical oil and gas leakage scenarios can reach several hundred ppb or higher, exhibiting strong high-contrast spatial distributions. The proposed method shows good sensitivity to such concentration perturbations and is capable of effectively detecting abnormal

enhancement signals. In terms of spatial performance, with appropriate matching between the telescope system and imaging parameters, a spatial resolution of approximately 25–50 m can be achieved under typical orbital conditions, enabling fine localization of methane point-source emissions. In terms of spectral performance, the system can effectively resolve methane absorption features, providing reliable support for subsequent retrievals.

In summary, the proposed detection scheme demonstrates strong feasibility for spaceborne point-source methane monitoring and can meet relevant technical requirements. The system exhibits balanced performance in concentration sensitivity, spatial resolution, and spectral discrimination capability, providing a viable technical solution for the engineering implementation of spaceborne methane detection systems, and laying a solid theoretical and experimental foundation for further optimization and development. Moreover, the integrated methodology of theoretical modeling, simulation analysis, and experimental validation presented in this work may also serve as a useful reference for other spaceborne trace gas remote sensing technologies.

Keywords: Methane; Point Source Monitoring; Fabry–Pérot Interferometer; Concentration

Change

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 42405143), the Western Young Scholars Program of the Chinese Academy of Sciences (Grant No. XAB 2016A07), the Natural Science Basic Research Program of Shaanxi Province (Grant No. 2019JQ-931), and the Cross Innovation Team Program of "Light of West China" of the Chinese Academy of Sciences (Grant No. E1294301).

These authors contributed equally.

† Corresponding author. E-mail: fytciom@126.com

The first author. E-mail: johnson_zhang1994@126.com