

引用格式: ZHANG Qiang, BAI Caixun, FU Di, et al. Simulation Analysis of Key Parameters for CH₄ Gas Point Source Detection Based on F-P Interferometer[J]. Acta Photonica Sinica, 2024, 53(1):0130001

张强, 柏财勋, 傅颀, 等. 基于 F-P 干涉仪 CH₄ 气体点源探测关键参数仿真分析[J]. 光子学报, 2024, 53(1):0130001

基于 F-P 干涉仪 CH₄ 气体点源探测关键参数 仿真分析

张强^{1,2}, 柏财勋³, 傅颀¹, 李娟¹, 畅晨光¹, 赵珩翔¹, 王素凤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)

(3 山东理工大学 物理与光电工程学院, 淄博 255000)

摘要: 基于多光束干涉光谱成像原理, 研究一种高空间分辨率甲烷气体点源探测方法。首先, 介绍了甲烷气体探测器的工作原理和探测方案, 详细设计法布里-珀罗干涉仪的系统参数, 并建立甲烷气体探测正演模型。然后, 分析了干涉信号和甲烷浓度之间的对应关系, 以及仪器参数对探测灵敏度的影响。最终, 迭代优化得到各光学结构参数的最优取值。结果表明, 在甲烷探测波段为 1 630~1 675 nm, 自由光谱范围为 12.5 nm, 光谱分辨率为 0.1 nm, 法布里-珀罗标准具腔长为 0.08 mm, 腔内反射率为 97.5%, 截止滤光片范围为 (1 630±4) nm~(1 675±4) nm 时, 探测源 25% 浓度变化对应的干涉信号相对变化量范围为 [0.65%, 4.30%], 探测灵敏度较好。研究结果可为高精度碳监测提供理论依据和技术支撑。

关键词: 温室气体探测; 甲烷; 法布里-珀罗干涉仪; 探测灵敏度

中图分类号: TP722.5

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20245301.0130001

0 引言

温室气体二氧化碳(CO₂)、甲烷(CH₄)的增加会直接导致全球气候的变化, 对各国经济及人类生活造成巨大影响。CH₄作为地球的第二大温室气体, 在 100 年时间段内, 它的全球增温潜势是 CO₂ 的 30 倍, 且寿命约为 9.1 年。目前, 人为 CH₄ 排放源于大量的点源, 主要通过煤矿开采、垃圾填埋、水稻耕作、饲养牲畜等活动产生, 减少 CH₄ 排放量的措施将会降低全球变暖速率, 因此开展温室气体 CH₄ 监测技术研究, 调查重点碳排放源等至关重要^[1]。

高光谱卫星遥感探测温室气体已成为点源探测的候选技术, 具有视点高、视域广、能够实现动态监测、获得更加高精度、满足需求的信息数据等优势^[2], 欧空局的 Sentinel-5p 卫星的仪器 TROPOMI 可用于量化监测非常强的排放物, 如工业“爆炸”事件等, 但其空间分辨率限制在公里级以上^[3]。加拿大的 GHGsat-D 卫星用于 CH₄ 气体监测, 在 12 km×12 km 的目标监视场中达到 50 m×50 m 的空间分辨率, 载荷重量小于 15 kg, 兼具小尺度、高精度、高空间分辨率的优势。2019 年, GHGsat-D 卫星发现一个石油生产区大量 CH₄ 泄露, 精确定位泄漏源, 并将其位置反馈给相关技术人员, 实现了 CH₄ 点排放源的高精度探测目标^[4]。

我国的卫星遥感温室气体监测也已广泛开展, 中国科学院长春光机所、中国科学院安徽光机所等多家单位均开展研究, 并实现载荷在轨应用, 为温室气体的源汇分析提供数据支持^[5]。现有载荷技术均面向大卫星平台, 实现大幅宽下的低空间分辨率监测, 基于传统光栅分光、迈克尔逊及空间外差等干涉手段无法满足对小型人为排放源进行高效率、高精度的监测, 难以实现点源探测, 因此, 需要开展高精度、高空间分辨的卫

基金项目: 国家自然科学基金(No. 41005019), 中国科学院西部青年学者项目(No. XAB 2016A07), 陕西省自然科学基金基础研究计划(No. 2019JQ-931), 中国科学院西部之光交叉团队项目(No. E1294301)

第一作者: 张强, johnson_zhang1994@126.com

通讯作者: 冯玉涛, fytciom@126.com

收稿日期: 2023-05-30; **录用日期:** 2023-07-17

<http://www.photon.ac.cn>

星遥感碳监测技术研究^[6-10]。

法布里-珀罗 (Fabry-Pérot, F-P) 干涉技术具有极高的光谱分辨率, 可以分辨出波长差极细微的光谱线^[11]。该技术的理论基础是多光束等倾干涉原理, 通过干涉圆环可以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 CH₄ 气体浓度与光谱曲线凹陷深度关系, 具有高光谱分辨率、高空间分辨率的点源探测优势^[4]。在 CH₄ 气体探测中, F-P 干涉仪及滤光片的参数对探测灵敏度具有较大影响, 合理设置相关参数对于提高探测精度十分重要。

本文研究基于 F-P 干涉光谱成像技术的 CH₄ 气体点源探测原理, 阐述探测方案, 设计 F-P 干涉仪系统参数, 建立 CH₄ 探测正演模型, 分析干涉信号和 CH₄ 浓度变化的关系, 及仪器参数 F-P 腔长、腔内反射率及截止滤光片范围对探测灵敏度的影响, 为 CH₄ 气体探测及后续仪器研制提供理论依据和技术支撑。

1 基于 F-P 干涉仪甲烷气体点源探测原理

1.1 F-P 多光束干涉原理

F-P 干涉仪是探测系统的核心部件, F-P 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, 平板内的入射角为 θ , 平板内腔内折射率为 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, 可表示为

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

式中, $F = 4R/(1-R)^2$, R 为腔内表面的反射率。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]。

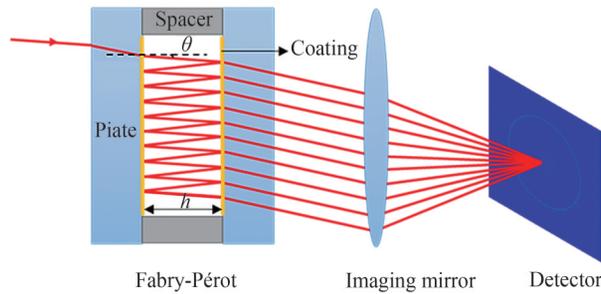


图 1 平行平板多光束干涉原理

Fig.1 Framework of parallel plate multi-beam interference

1.2 甲烷浓度测量方法

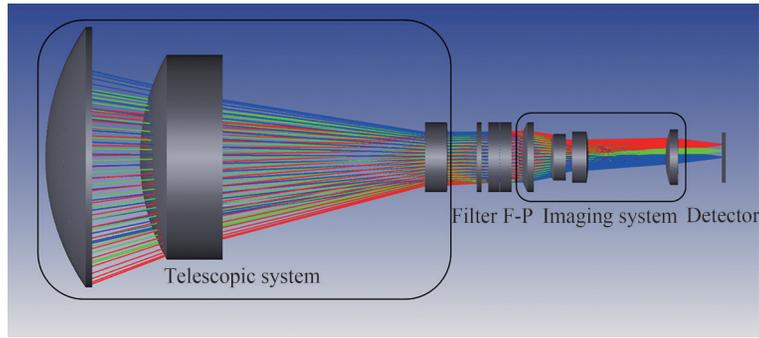
CH₄ 浓度测量方案是利用固定腔 F-P 对地面像元的太阳反射散射光谱进行透射调制, 根据采集到的调制信号变化即可反演出观测区域大气 CH₄ 吸收强度变化信息, 借助系统高分辨率的优势, 进而可在均匀背景下识别出 CH₄ 的排放源头。基于 F-P 干涉仪 CH₄ 探测系统主要由望远系统、滤光片、固定腔 F-P 标准具、成像系统、探测器构成, 如图 2。

探测器中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及 F-P 透射函数的乘积积分, 计算模型为

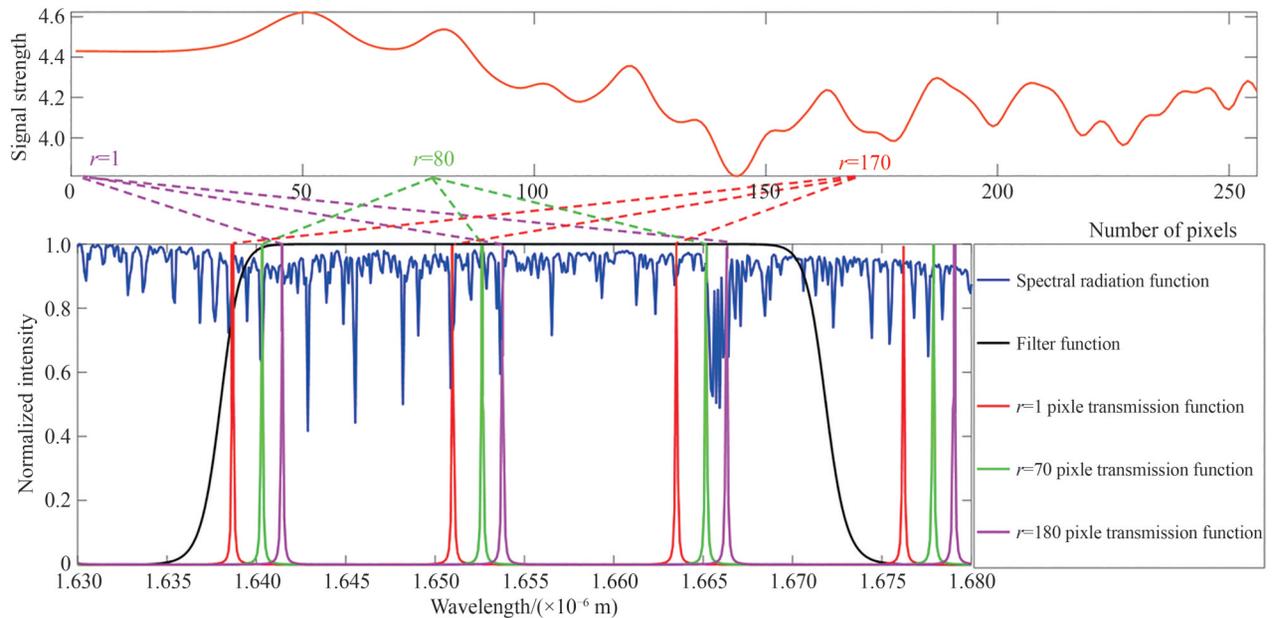
$$S = \int L(\lambda) * T_{OSF}(\lambda) * T_{FP}(\theta, \lambda) d\lambda \quad (2)$$

式中, $L(\lambda)$ 为关于波长 λ 的目标光谱辐射函数, $T_{OSF}(\lambda)$ 为滤光片的透射函数, $T_{FP}(\theta, \lambda)$ 为 F-P 的透射函数, * 表示卷积。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。

固定腔 F-P 透射函数仅与光线入射角有关, 可以表示为与视场中心像元偏移距离 r 的函数, 对于 $r=1$ 的像

图2 基于F-P干涉光谱成像仪CH₄探测系统示意Fig.2 Diagram of CH₄ detection system based on F-P interferometric spectral imager

元,F-P透射函数如图3中紫线所示,采集到的信号为F-P透射函数(紫线)、滤光片光谱透射函数(黑线)和目标CH₄光谱(蓝线)的乘积积分结果。同样地,随着卫星平台的推扫,观测目标点移动到其他像元位置,绿线、红线分别为目标移动到 $r=80$ 、 $r=170$ 像元时信号的生成过程。当观测目标扫描穿过成像视场后,可以得到关于像元偏移距离 r 的光谱曲线,如图3橘色线所示,最后利用CH₄气体浓度与光谱曲线凹陷深度关系即可反演出相关信息。F-P透射函数是影响输出信号的重要因素,因此,核心部件F-P标准具的相关设计是关键研究内容。

图3 基于F-P干涉仪CH₄探测原理Fig.3 Schematic of CH₄ detection based on F-P interferometer

2 探测系统参数设计与分析

CH₄气体的吸收带在1 660 nm和1 330 nm附近出现峰值,且在1 660 nm处水蒸气、CO₂等气体没有明显吸收,因此,探测波段1 630~1 675 nm测量结果更为准确,具有探测优势^[13]。根据GHGsat-D的指标参数,探测轨道高度为514 km,空间分辨率为50 m×50 m,自由光谱范围为12.5 nm,光谱分辨率为0.1 nm,地面采样间距为24 m,监测幅宽大于12 km×12 km,探测器像元尺寸为15 μm,像元数量为640×512,信噪比均值为200^[4]。

2.1 F-P干涉仪参数设计与分析

F-P干涉仪是甲烷探测系统的关键部件。根据设计指标中自由光谱范围及光谱分辨率可得,条纹精细度 $N=125$,条纹精细度的定义为

$$N = \frac{\pi \sqrt{R}}{1 - R} \quad (3)$$

式中, R 为腔内反射率, $R=97.5\%$ 。

F-P的自由光谱范围与腔长的关系为

$$\Delta\lambda_{\min} = \frac{\lambda^2}{2nh} \quad (4)$$

式中, $\Delta\lambda_{\min}$ 为自由光谱范围, λ 为中心波长, n 为腔内介质的折射率,腔长 $h=0.11$ mm,F-P干涉仪参数如表1。

表1 F-P干涉仪参数
Table 1 Parameters of F-P interferometer

Parameter	Value
Wavelength band	1 630~1 675 nm
Central wavelength	1 650 nm
Free spectral range	12.5 nm
Clear aperture	22 mm
Spectral resolution	0.1 nm
Cavity length h	0.11 mm
Intracavity reflectance R	97.5%
Index of refraction of medium n	1

2.2 光学系统参数设计与分析

探测光学系统主要由望远系统和成像系统构成,根据主要技术指标,利用焦距公式

$$f' = \frac{ah}{L} \quad (5)$$

式中, a 为像元尺寸, h 为轨道高度, L 为地面采样间距。计算出整体光学系统总焦距 $f'=321.25$ mm,根据探测器靶面的大小,整体光学系统视场角 $2\omega=1.37^\circ$ 。利用公式

$$f'_3 = F \cdot D_3 \quad (6)$$

式中, f'_3 为成像系统焦距, F 为整体光学系统 F 数,可通过量子效率信噪比模型计算得到 $F=4$, D_3 为成像系统孔径大小,F-P的通光孔径为22 mm,即 $D_3=22$ mm,可得成像系统焦距为88 mm。

根据像高公式

$$f' \tan 2\omega = f'_3 \tan 2\omega_3 \quad (7)$$

式中, f' 为光学系统总焦距, f'_3 为成像系统焦距, 2ω 为整体光学系统视场角, $2\omega_3$ 为成像系统视场角,计算出成像系统视场角 $2\omega_3=5^\circ$,即F-P的干涉孔径角为 5° 。

$$\Gamma = D_1/D \quad (8)$$

式中, Γ 为望远系统的放大率, D 为整体光学系统孔径, D_1 为成像系统孔径, $\Gamma=1/3.65$ 。

经计算,整体光学系统及各子光学系统的参数如表2。

表2 光学系统参数
Table 2 Parameters of optical system

Optical system	Focal length/mm	$2\omega/^\circ$	D /mm	Magnification
Integrated optical system	321.25	1.37	80	\
Telescopic system	\	1.37	80	1/3.65
Imaging system	88	5	22	\

3 甲烷探测正演模型设计结果

正演模型是描述仪器光学成像过程的数值模拟模型,通过大气辐射的物理性质,仪器参数等代入模型中,经过模拟计算得到预期的原始数据。基于F-P干涉仪 CH_4 的正演链路传输如图4,主要有光谱辐射传输模型、滤波函数模型、F-P透射函数模型等。

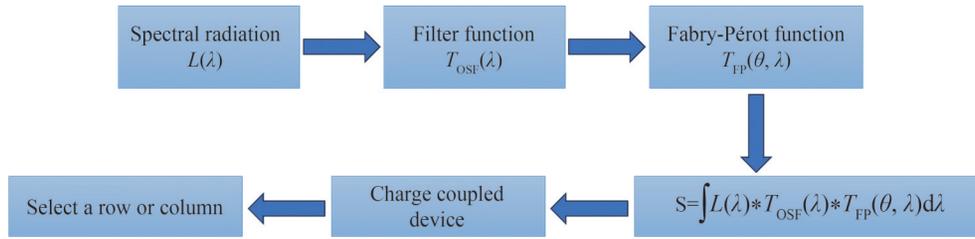


图4 正演链路传输框图

Fig.4 Forward link transmission block diagram

大气上行辐射光谱是正演链路的数据基础,利用LBLRTM计算出CH₄探测波段(1 630~1 675 nm)的大气上行总辐射,大气吸收分子包括CH₄、CO₂、H₂O等,光谱分辨率为0.01 nm。不同浓度CH₄下的大气上行辐射吸收谱如图5,浓度变化分别为0、5%、10%、15%、20%、25%^[14]。

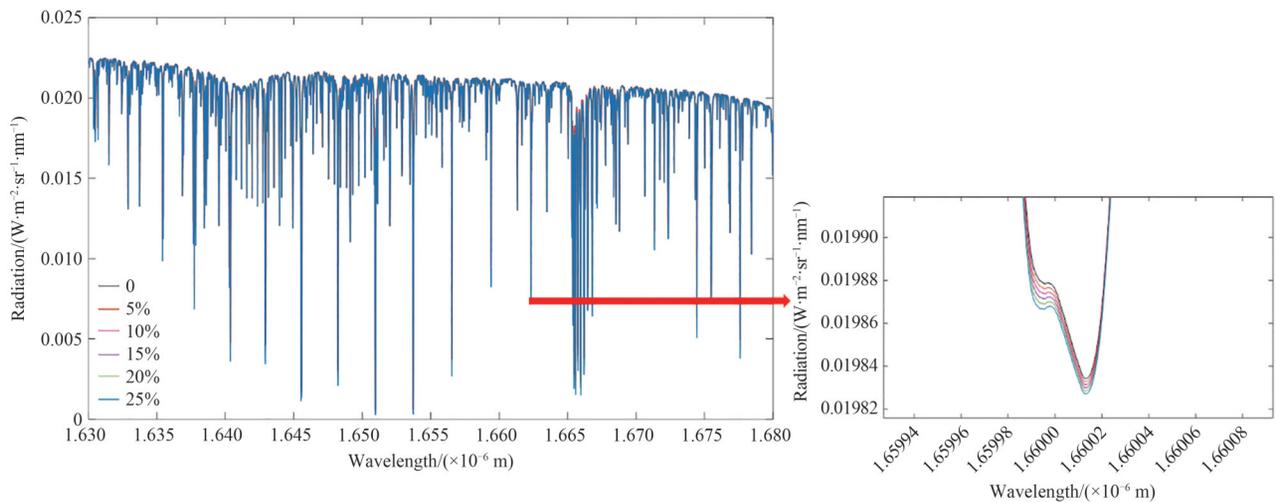


图5 不同CH₄浓度下的大气上行辐射吸收特征

Fig.5 Upward radiation absorption characteristics of the atmosphere under different CH₄ concentrations

滤光片的透射函数用于选择特定波长范围的大气吸收谱,根据甲烷波段大气上行总辐射,滤波函数截止波长为1 630~1 675 nm,如图6中黑线所示。F-P透射函数根据式(1)建立,光线入射角 θ 可通过探测器靶面大小及成像镜焦距确定, $R=97.5\%$ 、 $h=0.11$ mm的F-P透射函数曲线如图6中黄线所示。

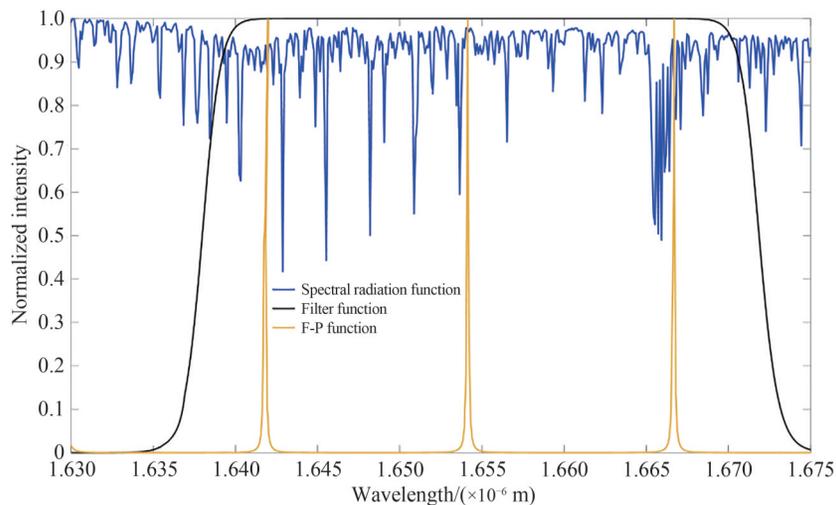


图6 仪器响应函数模型

Fig.6 Instrument response function model

带通滤光片允许多种F-P传输模式,光谱辐射函数受到F-P透射函数的调制,由于F-P透射函数仅与光线入射角 θ 相关,可以表示为半径的函数,因此在图像中以“光谱环”的形式呈现。在每个半径处,探测器阵列上的信号是光谱辐射函数乘以滤光片、F-P的透射函数并沿波长积分,原始CH₄浓度下探测器干涉圆环图样如图7,在探测器上选取第256行作为输出信号,如图8中绿线所示。

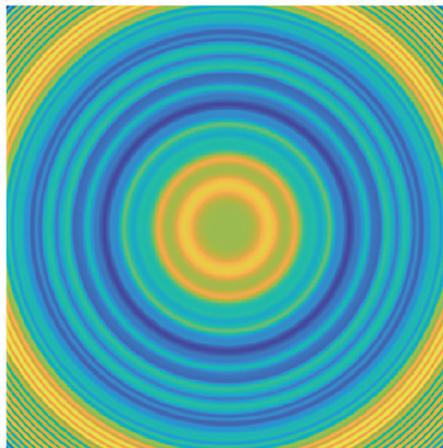


图7 原始浓度下探测器干涉圆环图样

Fig.7 Detector interference ring pattern at original concentration

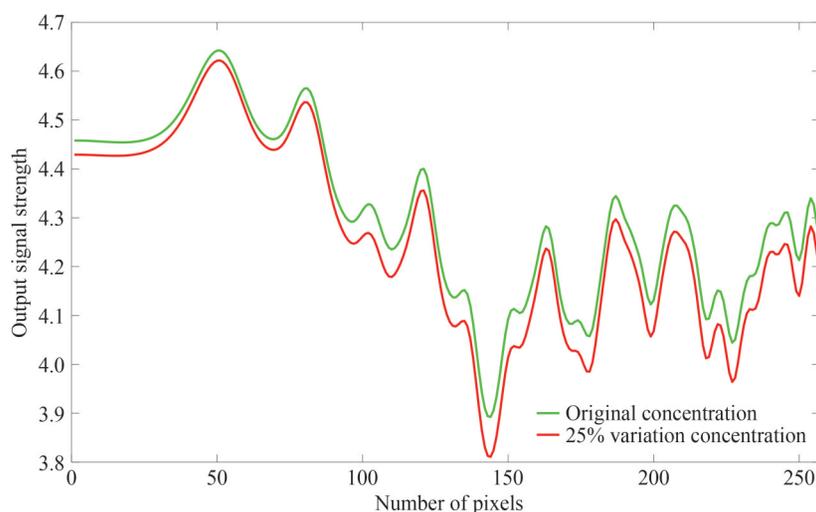


图8 原始浓度、浓度变化25%的仪器输出信号

Fig.8 Instrument output signal with original concentration and concentration change of 25%

4 探测灵敏度分析

基于上述正演模型,通过固定浓度变化下干涉信号强度变化量建立探测灵敏度计算模型,对F-P腔长、F-P腔内反射率、滤光片参数等对探测灵敏度影响进行了分析,确定各仪器参数的最优取值。

4.1 探测灵敏度分析模型

不同CH₄浓度输出信号相对变化量可以表征探测灵敏度,相对变化量范围越大,探测灵敏度就越好,其计算模型为

$$M = \left| \frac{S_1 - S_0}{S_0} \right| \times 100\% \quad (9)$$

式中, M 为两浓度探测源下输出信号强度相对变化量, S_0 为原始浓度的输出信号强度, S_1 为浓度变化后输出信号强度。甲烷浓度变化25%时,将该浓度下的光谱辐射函数、F-P结构参数等输入到综合传输模型中,采集的信号如图8中红线所示,两信号的相对变化量范围为[0.44%, 2.1%],如图9所示。

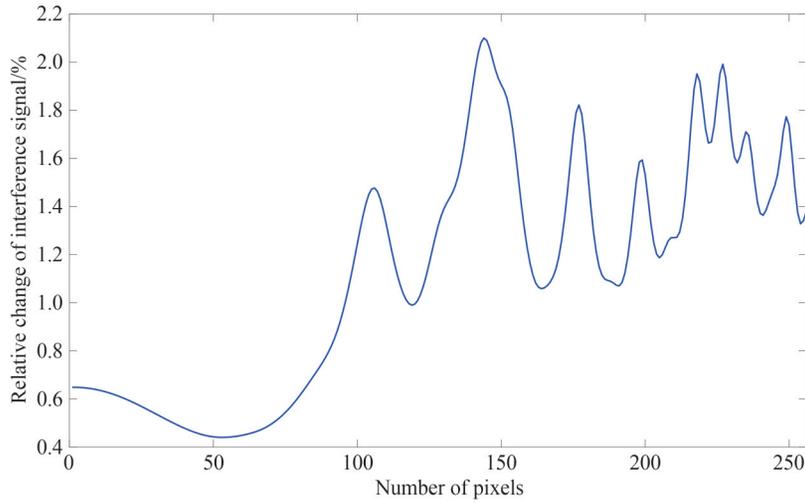


图9 浓度变化25%的仪器输出信号相对变化量

Fig.9 The relative change in the output signal of the instrument with a concentration change of 25%

4.2 F-P腔长

F-P标准具的腔长是决定干涉仪分辨率和测量精度的重要因素。由于光线进入空气腔后会多次反射和干涉,干涉图样的特征与腔长密切相关,根据式(6),腔长越长,光谱分辨率越高,能够分辨的波长差也就越小,测量精度越高,但腔长的增加会导致仪器体积增加等问题。F-P干涉仪设计指标中腔长 $h=0.11$ mm,因此选择腔长变化范围为0.05~0.2 mm,腔内反射率 $R=97.5\%$,CH₄气体25%浓度变化下干涉信号强度相对变化量如图10。干涉信号的相对变化极值如表3,表中 M_{\max} 为干涉信号相对变化的极大值, M_{\min} 为干涉信号相对变化的极小值。

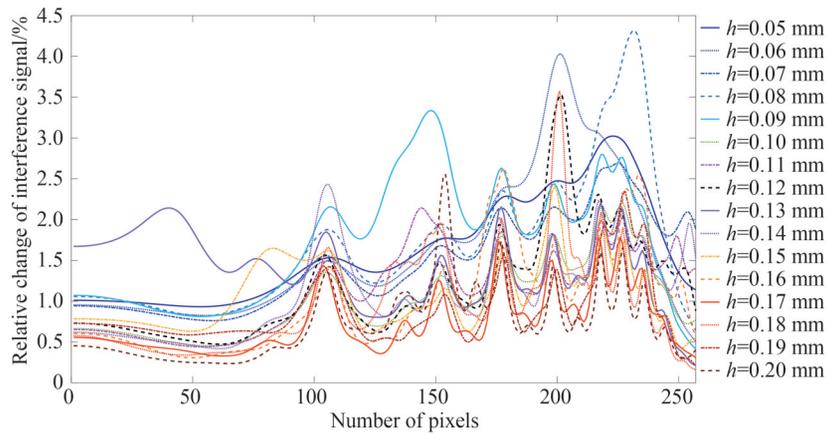


图10 腔长变化时,干涉信号相对变化

Fig.10 Change in cavity length, the relative change of interference signal

表3 腔长变化时,干涉信号相对变化极值

Table 3 Change in cavity length, the relative change extreme value of the interference signal

Cavity length/mm	$M_{\max}/\%$	$M_{\min}/\%$	Cavity length /mm	$M_{\max}/\%$	$M_{\min}/\%$
0.05	3.02	0.93	0.13	2.20	0.80
0.06	4.03	0.83	0.14	2.43	0.42
0.07	2.69	0.76	0.15	2.41	0.42
0.08	4.32	0.65	0.16	2.63	0.31
0.09	3.34	0.42	0.17	1.78	0.33
0.10	2.21	0.45	0.18	3.57	0.16
0.11	2.14	0.44	0.19	2.35	0.20
0.12	3.52	0.47	0.20	2.56	0.24

结果表明,腔长 $h=0.08$ mm 时,干涉信号相对变化量范围为 $[0.65\%, 4.32\%]$,探测灵敏度较好。

4.3 F-P腔内反射率

F-P标准具的腔内反射率是指光线在腔内多次反射后与反射前的光强比值,通常用镀膜或材料选择的方式来控制,腔内反射率会影响F-P标准具的光学性能和测量精度。对于固定腔长,腔内反射率越高,干涉条纹越锐利,有利于标准具的分辨率。设计指标腔内反射率 $R=97.5\%$,因此选择腔内反射率变化范围 $90\% \sim 99.5\%$,腔长 $h=0.08$ mm,25%浓度变化下干涉信号强度相对变化量如图11,干涉信号的相对变化极值如表4。

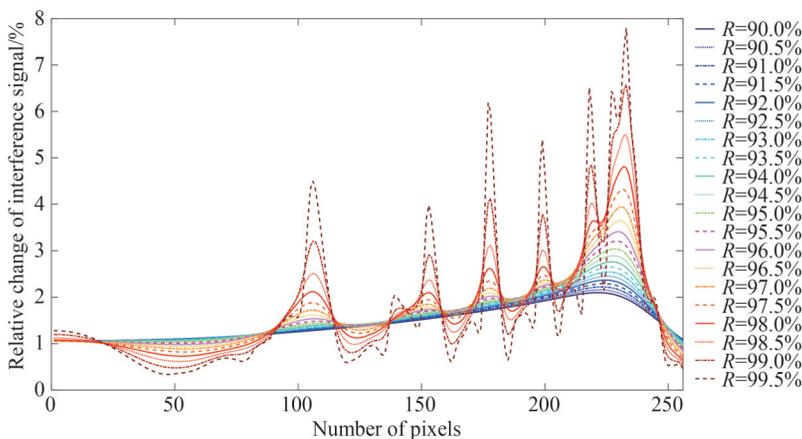


图11 腔内反射率变化时,干涉信号的相对变化

Fig.11 Change in intracavity reflectivity, the relative change of interference signal

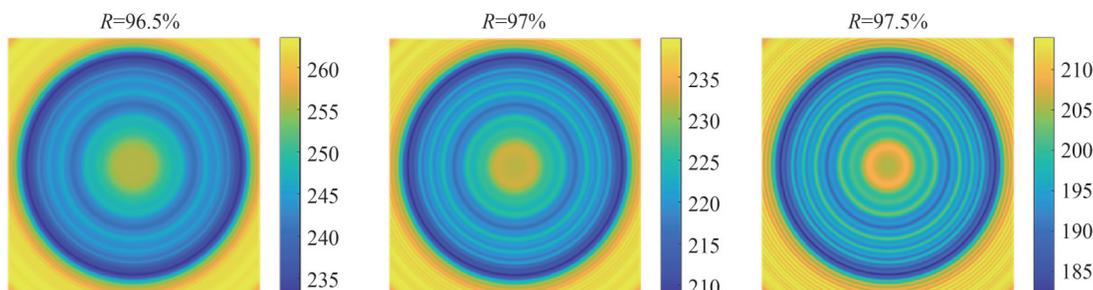
表4 腔内反射率变化时,干涉信号相对变化极值

Table 4 Change in intracavity reflectivity, the relative change extreme value of the interference signal

Intracavity reflectivity / %	$M_{max} / \%$	$M_{min} / \%$	Intracavity reflectivity / %	$M_{max} / \%$	$M_{min} / \%$
90	2.09	1.05	95	3.04	0.87
90.5	2.16	1.04	95.5	3.21	0.84
91	2.22	1.03	96	3.41	0.79
91.5	2.29	1.02	96.5	3.65	0.75
92	2.37	1.01	97	3.95	0.70
92.5	2.45	0.99	97.5	4.32	0.65
93	2.54	0.98	98	4.81	0.59
93.5	2.65	0.96	98.5	4.59	0.52
94	2.76	0.94	99	6.57	0.46
94.5	2.89	0.91	99.5	7.39	0.34

从图11及表4可以看出,随着反射率的增加,干涉信号相对变化量范围越大,但信噪比会制约反射率的增加,因此需要根据信噪比及具体需求选择合适的腔内反射率,以达到优化仪器性能的目的。根据信噪比计算模型,选择腔内反射率变化范围 $96.5\% \sim 99\%$,腔长 $h=0.08$ mm,各反射率下信噪比如图12。

从图12可以看出,随着反射率的增加,信噪比减小,根据信噪比设计指标200,选择腔内反射率为 $R=97.5\%$ 。



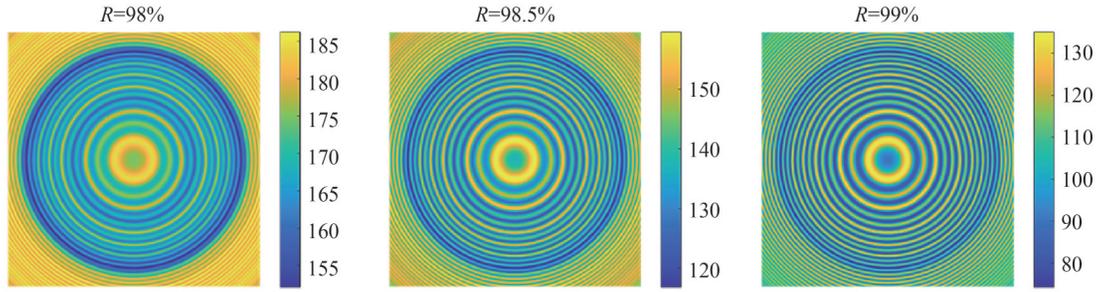


图12 不同反射率下的探测信噪比

Fig.12 Detection signal-to-noise ratio under different reflectivity

4.4 截止滤光片范围

滤光片是一种用于选择特定波长范围内光线透过率的光学元件,其透射函数可通过测量其光谱透过率来确定。由于滤光片的透射函数并不是理想的矩形窗口函数,而是具有一定的斜率和过渡带宽,因此它的截止滤光片范围对透射函数有一定的影响。初始截止波长为1 630~1 675 nm,通过滤波函数左右各展宽、变窄0~8 nm,分析25%浓度变化下干涉信号强度相对变化量如图13,干涉信号的相对变化极值如表5。

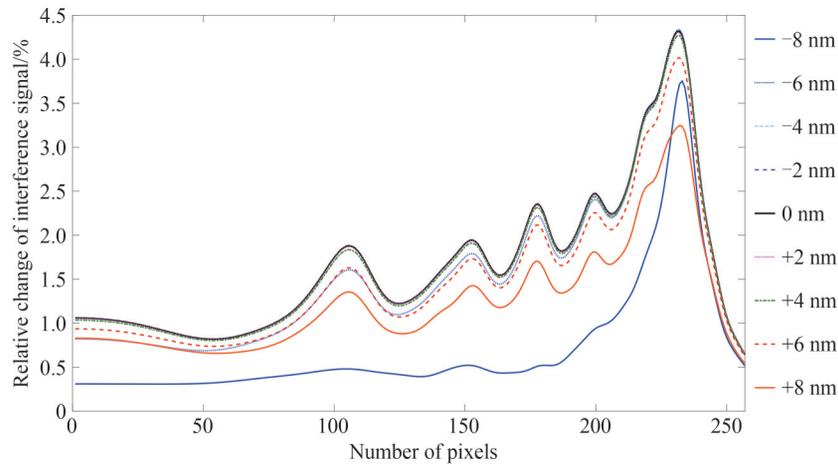


图13 截止滤光片范围变化时,干涉信号的相对变化

Fig.13 Cut-off filter range change, the relative change of interference signal

表5 截止滤光片范围变化时,干涉信号相对变化极值

Table 5 Cut-off filter range change, the relative change extreme value of the interference signal

Spread/nm	$M_{max}/\%$	$M_{min}/\%$	Narrow/nm	$M_{max}/\%$	$M_{min}/\%$
2	4.31	0.65	2	4.32	0.65
4	4.27	0.64	4	4.33	0.65
6	4.02	0.62	6	4.34	0.64
8	3.25	0.54	8	3.75	0.52

结果表明,截止滤光片范围左右展宽、变窄2 nm,干涉信号相对变化量范围分别为 $[0.65\%, 4.31\%]$ 、 $[0.65\%, 4.32\%]$,左右展宽、变窄4 nm,干涉信号相对变化量范围分别为 $[0.62\%, 4.27\%]$ 、 $[0.65\%, 4.33\%]$,左右展宽6 nm干涉信号相对变化量范围 $[0.64\%, 4.34\%]$,均对探测灵敏度影响较小。

5 结论

本文研究基于F-P干涉光谱成像仪的CH₄气体探测技术,建立了CH₄探测正演数理模型,研究了干涉图样和CH₄浓度变化的关系。重点优化分析了干涉仪参数、滤波参数对输出信号灵敏度的影响。结果表明,甲烷探测波段1 630~1 675 nm,自由光谱范围12.5 nm,光谱分辨率0.1 nm,F-P腔长为0.08 mm,腔内反射率为97.5%,截止滤光片范围为 $(1\ 630 \pm 4)$ nm~ $(1\ 675 \pm 4)$ nm时,探测源25%浓度变化下的干涉信号相对

变化量为[0.65%, 4.30%],探测灵敏度较好。研究结果可为CH₄气体遥感探测及后续相关仪器研制提供重要的理论依据。

参考文献

- [1] ZHENG Yuquan. Development status of remote sensing instruments for greenhouse gases[J]. Chinese Optics, 2011, 4(6): 546-561.
郑玉权. 温室气体遥感探测仪器发展现状[J]. 中国光学, 2011, 4(6): 546-561.
- [2] WANG Qiansheng, LUO Haiyan, LI Zhiwei, et al. Research progress of spaceborne passive remote sensing detection payload of greenhouse gases[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2023, 27(4): 857-870.
汪钱盛, 罗海燕, 李志伟, 等. 温室气体星载被动遥感探测载荷研究进展[J]. 遥感学报, 2023, 27(4): 857-870.
- [3] DE VRIES J, LAAN E C, HOOGEVEE R W M, et al. TROPOMI: Solar backscatter satellite instrument for air quality and climate[C]. SPIE, 2007, 6744: 85-92.
- [4] JERVIS D, MCKEEVE J, DUURAK B O A, et al. The GHGSat-D imaging spectrometer [J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2021, 14(3): 2127-2140.
- [5] XIONG Wei. Optimization design and data analysis of greenhouse gases monitoring instrument on GF-5 satellite [J]. Aerospace Shanghai, 2019, 36(S2): 167-172.
熊伟. 高分五号卫星大气主要温室气体监测仪优化设计及数据分析[J]. 上海航天, 2019, 36(S2): 167-172.
- [6] BOVENSMA H, BURROWS J P, BUCHWITZ M, et al. SCIAMACHY: Mission objectives and measurement modes [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1999, 56(2): 127-150.
- [7] CRISP D, MILLER C E, DECOLA P L. NASA orbiting carbon observatory: measuring the column averaged carbon dioxide mole fraction from space [J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2008, 2(1): 023508.
- [8] SUTO H, KATAOKA F, KIKUCHI N, et al. Thermal and near-infrared sensor for carbon observation Fourier transform spectrometer-2 (TANSO-FTS-2) on the Greenhouse gases Observing SATellite-2 (GOSAT-2) during its first year in orbit [J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2021, 14(3): 2013-2039.
- [9] BERMUD F, ROUSSEAU S, PEQUIGNOT E, et al. IASI-NG program: a new generation of Infrared Atmospheric Sounding Interferometer [C]. 2014 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, IEEE, 2014: 1373-1376.
- [10] SHI H, LI Z, YE H, et al. First level 1 product results of the greenhouse gas monitoring instrument on the GaoFen-5 satellite [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2020, 59(2): 899-914.
- [11] ZHANG Chunmin. Interferometric spectral imaging technology [M]. 1st edition, Beijing: Science Press, 2010.
张淳民. 干涉成像光谱技术 [M]. 第1版, 北京: 科学出版社, 2010.
- [12] DU Shusong, WANG Yongmei, TAO Ran. Multiple beam interferential spectral imaging technology [J]. Acta Optical Sinica, 2013, 33(8): 0830003.
杜述松, 王咏梅, 陶然. 多光束干涉光谱成像技术 [J]. 光学学报, 2013, 33(8): 0830003.
- [13] LIU Shuanghui, LI Xiaoying, CAO Xifeng, et al. Development of atmospheric methane observation and distribution of global methane [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2022, 7(2): 436-450.
刘双慧, 李小英, 曹西凤, 等. 大气甲烷探测进展与全球甲烷分布分析 [J]. 遥感技术与应用, 2022, 7(2): 436-450.
- [14] CLOUGH S A, SHEPHARD M W, MLAWER E J, et al. Atmospheric radiative transfer modeling: a summary of the AER codes [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2005, 91: 233-244.

Simulation Analysis of Key Parameters for CH₄ Gas Point Source Detection Based on F-P Interferometer

ZHANG Qiang^{1,2}, BAI Caixun³, FU Di¹, LI Juan¹, CHANG Chenguang¹, ZHAO Hengxiang¹,
WANG Sufeng¹, FENG Yutao¹

(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)

(3 School of Physics and Optoelectronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China)

Abstract: The increase in greenhouse gases carbon dioxide and methane can directly lead to changes in the global climate and cause a significant impact on the economies of countries and human life. Methane, as the second-largest greenhouse gas on Earth, has a global warming potential 30 times higher than CO₂ over a

100-year period, and its lifespan is approximately 9.1 years. At present, anthropogenic CH₄ emissions primarily originate from numerous point sources. Implementing measures to reduce CH₄ emissions can help decrease the rate of global warming. Therefore, it is crucial to conduct research on monitoring technologies for CH₄ and investigate key carbon emission sources. Hyperspectral satellite remote sensing for detecting greenhouse gases has become a candidate technology for point source detection. It has advantages such as high viewpoint, wide field of view, the ability to achieve dynamic monitoring, obtain more precise and demand-driven information data. Utilizing remote sensing methods to monitor and provide feedback on point source emissions of greenhouse gases like methane plays a crucial role in effectively addressing climate change. Existing payload technologies in China are geared towards large satellite platforms, enabling wide-area coverage with low spatial resolution monitoring. However, traditional methods such as grating spectrometry, Michelson interferometry, and spatial heterodyne are unable to meet the efficient and high-precision monitoring requirements for small-scale anthropogenic emission sources. They struggle to achieve point source detection. Therefore, it is necessary to conduct research on satellite remote sensing carbon monitoring technologies that offer high accuracy and high spatial resolution.

The Fabry-Pérot interferometry technique possesses extremely high spectral resolution, capable of discerning minute wavelength differences in the spectrum. The theoretical basis of this technique is the multi-beam equal-inclination interferometry. By using an interference ring, it is possible to directly obtain the spectral information of target light at different incident angles. By collecting the spectral information corresponding to different wavelengths of the target at different positions from multiple consecutive shots, the target spectral curve is obtained. This technique establishes a relationship between CH₄ gas concentration and the depth of spectral curve notches, offering advantages in point source detection with high spectral resolution and high spatial resolution. In CH₄ gas detection, the parameters of the Fabry-Pérot interferometer and the optical filter have a significant impact on detection sensitivity. Properly configuring these parameters is crucial for improving detection accuracy.

This paper presents a study on a high spatial resolution method for detecting point sources of methane gas based on the principle of multi-beam interferometric spectral imaging. Firstly, the working principle and detection scheme of the methane gas detector are introduced. The system parameters of the Fabry-Pérot interferometer are designed, and a forward model for methane gas detection is established. Subsequently, the correspondence between interference signals and methane concentration, as well as the influence of instrument parameters on detection sensitivity, are analyzed. In the end, iterative optimization is performed to obtain the optimal values of various optical structural parameters. The results indicate that within the methane detection wavelength range of 1 630~1 675 nm, with a free spectral range of 12.5 nm and a spectral resolution of 0.1 nm, the optimal parameters for the Fabry-Pérot interferometer are a cavity length of 0.08 mm and an intra-cavity reflectance of 97.5%. By using a cutoff filter with a range of $(1\ 630 \pm 4)$ nm ~ $(1\ 675 \pm 4)$ nm, the relative change in interference signal corresponding to a 25% concentration variation of the detection source falls within the range of [0.65%, 4.30%], indicating a good detection sensitivity. The research results of this study provide a theoretical basis and technical support for high-precision.

Key words: Greenhouse gases detection; CH₄; Fabry-Pérot interferometer; Detection sensitivity

OCIS Codes: 120.0280; 010.1120; 110.3175; 1120.2230