

大孔径空间外差干涉光谱成像技术多谱段成像仿真

才啟胜 黄旻 韩炜 刘怡轩 路向宁

Simulation of multiband imaging technology of large aperture spatial heterodyne imaging spectroscopy

Cai Qi-Sheng Huang Min Han Wei Liu Yi-Xuan Lu Xiang-Ning

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 234205 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20180943

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20180943>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I23>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[用于超快束匀滑的动态波前调控新方案](#)

Novel dynamic wavefront control scheme for ultra-fast beam smoothing

物理学报.2018, 67(17): 174206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20172527>

[平面超透镜的远场超衍射极限聚焦和成像研究进展](#)

Advances in the far-field sub-diffraction limit focusing and super-resolution imaging by planar metalenses

物理学报.2017, 66(14): 144206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.144206>

[基于光纤光栅的冲击激励声发射响应机理与定位方法研究](#)

Acoustic emission localization technique based on fiber Bragg grating sensing network and signal feature reconstruction

物理学报.2017, 66(7): 074210 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.074210>

[基于光克尔效应的径向光束匀滑新方案](#)

A novel radial beam smoothing scheme based on optical Kerr effect

物理学报.2016, 65(9): 094207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.094207>

[基于六角格子光子晶体波导的高效全光二极管设计](#)

High efficiency all-optical diode based on hexagonal lattice photonic crystal waveguide

物理学报.2016, 65(6): 064207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.064207>

大孔径空间外差干涉光谱成像技术多谱段 成像仿真*

才啟胜[†] 黄旻 韩炜 刘怡轩 路向宁

(中国科学院光电研究院, 计算光学成像技术重点实验室, 北京 100094)

(2018年5月12日收到; 2018年8月15日收到修改稿)

在大孔径空间外差干涉光谱成像技术(LASHIS)的基础上提出了一种多谱段成像方案. 其采用LASHIS的外差探测原理, 一方面, 可通过较少的采样点数实现很高的光谱分辨率, 保留了LASHIS的高光谱分辨率、高稳定性和高探测灵敏度的特点; 另一方面, 利用光栅的多级衍射性质, 实现同一系统的多谱段同时探测, 拓宽了光谱探测范围. 首先, 阐述了LASHIS多谱段成像方案的基本原理; 然后, 分析了多谱段探测与谱段解混方式; 最后, 对该方案进行了计算机仿真模拟, 通过ZEMAX光线追迹的干涉图结果与理论计算结果相符合, 验证了方案的正确性. 基于LASHIS的多谱段成像方案所具有的高光谱分辨率、高探测灵敏度以及可实现同一系统的多谱段同时探测特点, 尤其适合温室气体等高稳定性、高探测灵敏度的多谱段高光谱探测应用.

关键词: 傅里叶变换光谱, 多谱段, 高光谱, 空间外差

PACS: 42.79.-e, 07.60.Rd, 42.25.Hz

DOI: 10.7498/aps.67.20180943

1 引言

干涉光谱成像技术通过获取的目标干涉强度信息, 经过傅里叶变换等数据处理过程反演出目标的光谱信息, 因此又称傅里叶变换光谱成像技术. 相对于色散型或滤光片型光谱仪, 其具有高通量、多通道、高光谱分辨率等优点, 已越来越多地应用在遥感探测、目标识别、大气成分探测等方面. 传统干涉光谱成像技术中, 干涉图的采样点数需满足采样定理, 高光谱分辨率情况下干涉图的采样点数是巨大的, 这将会增大探测器阵列的尺寸或系统的采样时间. 为了克服这一缺点, 从20世纪90年代开始, 一种新型的干涉光谱成像技术——空间外差光谱技术(spatial heterodyne spectroscopy, SHS)受到了越来越多的关注与研究^[1-9]. SHS技术通过在干涉仪中加入特定的光学元件降低干涉图的空间频率, 可以利用较少的采样点数实现很高的光谱分

辨率. 虽然SHS技术具有极高的光谱分辨率, 但其基于Michelson干涉仪, 入射视场受到光谱分辨率的约束, 其能量分布在一定波数范围内的各个通道上, 探测灵敏度偏低. 针对上述问题, 相里斌研究员等^[10,11]提出了一种基于Sagnac干涉仪的大孔径空间外差干涉光谱成像技术(LASHIS), 该技术同样采用外差探测原理实现高光谱分辨率探测, 同时, 系统是点到点的完全成像系统, 没有通光孔径的限制, 具有高光通量和高探测灵敏度的特点.

不管是基于Michelson干涉仪的SHS技术, 还是基于Sagnac干涉仪的LASHIS技术, 探测的光谱范围均较窄, 这是由于探测器采样点数的限制, 光谱分辨率与光谱范围是相互制约的, 高光谱分辨率必然导致窄谱段范围, 宽谱段范围必然会使分辨率降低. 在实际应用中, 通常需要得到高的光谱分辨率和宽的谱段范围, 如在CO₂等温室气体探测方面, 需要对多个谱段进行高光谱分辨率的探测. 典型的“嗅碳”卫星有日本2009年发射的温室气

* 国家重点研发计划(批准号: 2016YFC0201100)和中国科学院光电研究院创新项目(批准号: Y70B02A11Y)资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: caiqs@aoe.ac.cn

体探测卫星 GOSAT (greenhouse gases observing satellite)^[12,13], 美国 2014 年发射的轨道碳观测者 2 号 OCO-2 (orbiting carbon observatory-2)^[14,15] 以及中国 2016 年发射的全球 CO₂ 源汇监测卫星 (TanSat)^[16-18]. 为了精确反演 CO₂ 的浓度, 需要探测多个谱段的高分辨率光谱曲线. 主要探测谱段为: CO₂ 强吸收带 (2.06 μm), CO₂ 弱吸收带 (1.61 μm) 以及 O₂-A 带 (0.76 μm)^[19]. 上述“嗅碳”卫星为了获取不同谱段的高分辨率光谱曲线, 采用了多台高分辨率光谱仪对每个谱段分别进行探测, 系统重量体积庞大. 若能够基于同一系统实现多个谱段的同时探测, 则可在保证探测谱段和光谱分辨率的同时极大地减轻系统体积和重量.

本文在 LASHIS 技术的基础上提出一种多谱段探测方案, 该方案在保留了 LASHIS 的高光谱分辨率、高探测灵敏度以及高稳定性的基础上, 利用光栅的多级衍射特性, 实现同一系统的多谱段同时探测. 该方案可极大地降低系统体积重量, 且无运动部件的特点特别适合于小型化机载或星载的高光谱探测需求. 本文对该多谱段探测方案的基本原理进行了详细阐述, 进一步给出设计实例, 建立了光学系统模型, 通过光线追迹的方法进行干涉图仿真与光谱复原, 验证了该技术的正确性与可行性.

2 理论分析

2.1 大孔径空间外差干涉光谱成像技术

LASHIS 技术是在大孔径静态干涉光谱成像技术 (LASIS) 的基础上加入了一对平行光栅从而实现波数外差的效果, 使其在窄谱段范围内具有极高的光谱分辨率^[20]. LASHIS 技术基本原理如图 1 所示, 主要包括: 准直系统 (collimating lens)、横向剪切干涉仪 (interferometer)、成像系统 (collecting lens) 和探测器 (detector). 在横向剪切干涉仪中加入了一对平行光栅 Grating 1 和 Grating 2, 两光栅的刻线密度相同, 刻线方向垂直于纸面且刻线平面互相平行. 物面上某点发出的光经过准直系统准直后成为平行光进入干涉仪中, 分束器将该平行光分为透射光和反射光两路, 两路光经过横向剪切干涉仪平行出射, 产生了一个横向剪切量. 随后, 两路平行光经过成像系统后在探测器上形成具有干涉强度调制的目标点的强度信息. 在成像过程中, 探测器的不同位置处得到不同地物目标点的不同

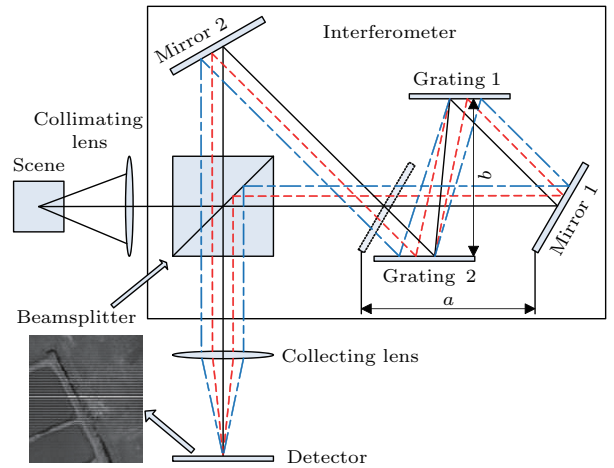


图 1 LASHIS 技术原理图

Fig. 1. Schematic of the LASHIS.

光程差干涉信息, 经过推扫后得到目标的完整干涉图.

LASHIS 在横向剪切干涉仪中加入的一对平行光栅, 使得系统得到的干涉图具有了波数外差的特点. 由于光线经过平行光栅对后, 出射方向不变, 仅产生横向偏移, 而不同波数的光衍射角不同, 使得不同波数的光具有不同的横向剪切量, 这从图 1 中的红色光线 (虚线) 与蓝色光线 (点划线) 的传播路径中看出, 红色光线与蓝色光线代表不同波数的光线, 经过干涉仪后, 蓝色光线的横向剪切量大于红色光线的横向剪切量. 对于某一特定的波数, 横向剪切量为零, 该波数称为外差波数 (或基准波数), 其产生的干涉图频率为零. 正是由于这种横向剪切量随波数变化的特点, 使得 LASHIS 得到的干涉图产生外差的效果, 降低了干涉图的频率, 从而可以通过较少的采样点数实现很高的光谱分辨率.

光线经过干涉仪后的干涉图表达式与两束光的横向剪切量相关. LASHIS 的横向剪切量由两部分组成, 一部分与波数有关, 由平行光栅对引入; 另一部分是反射镜 Mirror 1 偏离 Mirror 2 关于分束器的镜像位置所引入的, 该部分与 LASIS 的横向剪切量相同. 对于轴上光线, 平行光栅对引入的横向剪切量如图 2 所示, 由于两个光栅互相平行, 光线经过平行光栅对后传播方向不变, 只是产生一个横向偏移, 偏移量为

$$h(\sigma) = \frac{b}{\cos \beta} \sin(\alpha + \beta), \quad (1)$$

式中 σ 为入射光波数; b 为平行光栅对的间距; α 为光线在光栅上的入射角; β 为衍射角, 由光栅方程确定:

$$\sin \beta = \sin \alpha - \frac{mg}{\sigma}, \quad (2)$$

其中 m 为衍射级数; g 为光栅刻线密度.

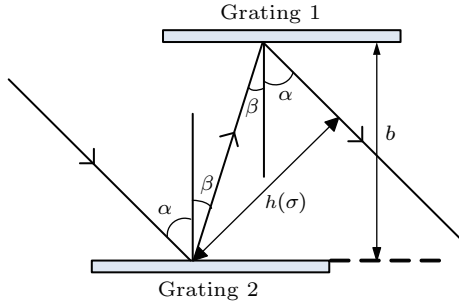


图2 平行光栅对引入的横向剪切量

Fig. 2. The lateral shearing introduced by the parallel gratings.

将 (2) 式代入 (1) 式, 可得

$$h(\sigma) = b \left\{ \tan \left[\arcsin \left(\sin \alpha - \frac{mg}{\sigma} \right) \right] \cos \alpha + \sin \alpha \right\} \approx p - \frac{q}{\sigma}, \quad (3)$$

式中 p, q 为与光栅对参数和入射角相关的两个参数. 由 (3) 式可以看出, 在光栅的入射角 α 变化量较小即入射干涉仪的视场较小情况下 (通常 $\pm 1^\circ$ 内), 且光谱范围较窄时, 平行光栅对引入的横向剪切量与波数的倒数成近似线性关系.

在横向剪切干涉仪中, Mirror 1 偏离 Mirror 2 的镜像位置所引入的横向剪切量为 u , 则总的横向剪切量为

$$D(\sigma) = 2h(\sigma) - u. \quad (4)$$

在小视场情况下, 同一波数的光产生的横向剪切量近似相同. 其干涉图的获取需要经过推扫提取特定目标点所对应的不同光程差下的干涉强度值. 通过推扫得到一系列目标图像后进行图像配准, 随后提取不同图像序列中同一地物目标点所对应的强度信息, 即得到该目标点所对应的干涉信息, 其干涉图的表达式为

$$I(x) = \int_{\sigma_{\min}}^{\sigma_{\max}} B(\sigma) \cos[2\pi x \sigma D(\sigma)/f] d\sigma = \int_{\sigma_{\min}}^{\sigma_{\max}} B(\sigma) \cos[2\pi A x (\sigma - \sigma_0)] d\sigma, \quad (5)$$

式中 $B(\sigma)$ 为入射光谱信息; f 为成像镜焦距; $\sigma_0 = 2q/(2p - u)$ 为外差波数; $A = (2p - u)/f$

为一常数. 从 (5) 式可以看出, 经过近轴近似处理后, LASHIS 的外差特点明显地表现出来: 干涉图的零频分量不再对应于零波数, 而是移到了 σ_0 处.

若探测器像元大小为 s , 第 0 个像元与光轴的距离为 φ , 则第 j 个像元处接收到的干涉强度值为

$$I_j = \int_{\sigma_{\min}}^{\sigma_{\max}} B(\sigma) \cos[2\pi A (s_j - \varphi)(\sigma - \sigma_0)] \times d\sigma. \quad (6)$$

进行光谱复原时, 对 (6) 式进行离散傅里叶逆变换, 复原出的第 k 个离散光谱为

$$B_k = \left| \sum_{j=0}^{N-1} I_j \exp \left(-i2\pi \frac{jk}{N} \right) \right|, \quad (7)$$

式中 N 为探测器的像素个数, 第 k 个离散光谱数据与波数的对应关系由驻定相位原理确定. 驻定相位原理指出, (7) 式中的指数项为零时, 其求和才显著不为零, 即

$$\sigma D(\sigma) - \frac{kf}{sN} = 0. \quad (8)$$

由此可得, 波数与第 k 个离散光谱数据的对应关系为

$$k = \frac{\sigma_k D(\sigma_k) s N}{f}. \quad (9)$$

2.2 多谱段探测方案

多谱段探测方案是在 LASHIS 的基础上, 利用光栅的多级衍射性质, 实现同一系统的多谱段同时探测, 拓宽系统的光谱范围, 其基本原理与 LASHIS 相类似, 所不同的是此时的光栅为多级衍射光栅如中阶梯光栅. 如图 3 所示, 对于光栅的某一衍射级次 m_1 , 波数为 σ_1 的入射光线经过光栅衍射后产生的衍射角为

$$\sin \beta_1 = \sin \alpha - \frac{m_1 g}{\sigma_1}. \quad (10)$$

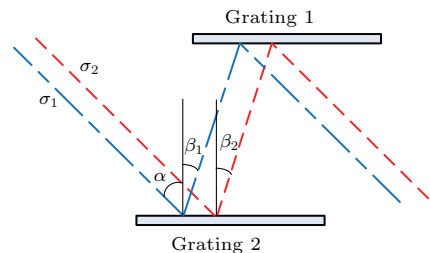


图3 多级衍射平行光栅对

Fig. 3. Parallel gratings with multistage diffraction.

对于光栅的另一衍射级次 m_2 , 波数为 σ_2 的入射光线经过光栅衍射后产生的衍射角为

$$\sin \beta_2 = \sin \alpha - \frac{m_2 g}{\sigma_2}. \quad (11)$$

当第 m_1 级衍射光与第 m_2 级衍射光的衍射角相同时, 两个衍射级次所对应波长的光线传播路径完全重合, 波数 σ_1 与波数 σ_2 的对应关系为

$$m_2 \sigma_1 = m_1 \sigma_2. \quad (12)$$

此时即可实现 σ_1 所对应谱段与 σ_2 所对应谱段的的同时探测. 当光栅存在多个衍射级次时, 可实现多个谱段的的同时探测.

对于某一探测谱段的光谱范围、光谱分辨率等参数的确定方法与 LASHIS 相似, 唯一的区别仅是衍射级次不同. 需要注意的是, 光谱仪系统对不同衍射级次的光谱范围应在所对应衍射级次的自由光谱范围之内, 若衍射级次 m_1 所对应的光谱范围为 $\sigma_{1 \min} - \sigma_{1 \max}$, 为了使其与衍射级次 m_2 所对应的谱段不重合, 则应保证

$$\sigma_{1 \max} \leq \sigma_{1 \min} + \frac{\sigma_{1 \min}}{m_1}. \quad (13)$$

由于在干涉仪系统中, 不同衍射级次的光混叠在一起, 经过干涉仪出射后, 在探测器成像之前, 需要进行谱段解混, 使不同的谱段成像在探测器的不同位置处或利用多个探测器接收不同谱段的干涉信息, 主要的谱段解混方式有两种.

1) 滤光片解混

如图 4 所示, 在探测器前放置一滤光片阵列, 滤光片不同条带对应不同透过率, 每一个条带可透过某一衍射级次的光, 这样, 在探测器不同区域对应了不同谱段的干涉图样, 经过傅里叶变换等数据反演流程后即可复原出不同谱段的光谱信息. 该方案的优点是结构简单, 仅需在探测器前放置一滤光片阵列. 缺点是无法获取被测目标完整谱段信息, 这是因为探测器不同位置对应了不同谱段, 而不同的位置也对应了不同地物目标, 因此某一地物目标只能得到其单一谱段的光谱信息, 为了获取地物目标的完整谱段信息, 可将滤光片阵列重新编排, 制作成类似于拜尔滤光片的形式, 通过牺牲空间分辨率来获取地物目标的完整谱段光谱信息.

2) 二向色分光镜解混

二向色分光镜与普通分光棱镜不同, 其可以选择性地透过和反射不同波长的光. 二向色分光镜

解混方式如图 5 所示, 在干涉仪的出射光路中设置不同的二向色分光镜, 由干涉仪出射的混叠在一起的不同谱段的光经过二向色分光镜后, 不同衍射级次所对应的谱段被分开, 随后被不同的探测器所接收. 与滤光片解混所不同的是, 该解混方式通过多个探测器分别采集不同谱段的干涉信息, 增加了硬件的数量, 但可以得到目标完整谱段的光谱信息.

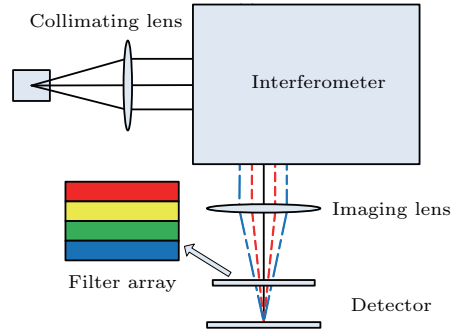


图 4 滤光片解混

Fig. 4. Multiband separation method by filter array.

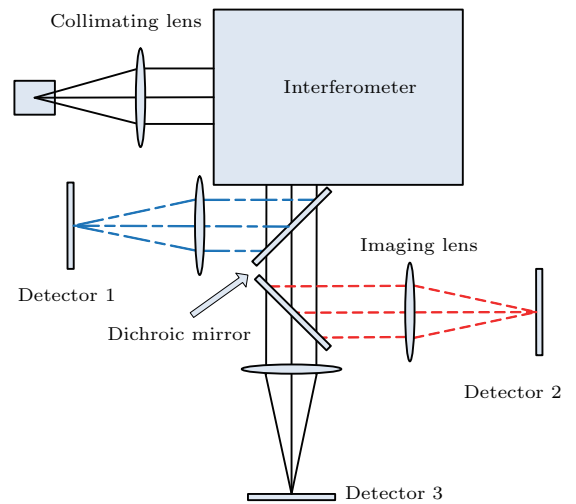


图 5 二向色分光镜解混

Fig. 5. Multiband separation method by dichroic mirrors.

3 系统仿真与分析

3.1 参数设计

系统的谱段范围和光谱分辨率与光栅和干涉仪的结构参数相关. 对于多谱段探测而言, 不同的谱段具有不同的衍射级次, 在某一谱段内, 将 $k = 0$ 代入 (9) 式, 可得到该谱段内的最大波数, 也是基准波数, 将 $k = N/2$ 代入可得该谱段内的最小波数, 即

$$D(\sigma_{\max}) = 0, \quad (14)$$

$$\sigma_{\min} D(\sigma_{\min}) - \frac{f}{2s} = 0. \quad (15)$$

若已知系统参数, 由(14)式和(15)式即可得到系统谱段范围; 反之, 若确定系统的光谱范围则可以推导出系统参数.

在某一谱段内的平均光谱分辨率可由(16)式确定:

$$\delta\sigma = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{N/2}. \quad (16)$$

系统参数设计时首先进行光栅参数的选取, 参考Thorlabs公司型号为GE2550-3263的阶梯光栅, 光栅刻线数为316 lines/mm, 光栅面大小为25 mm × 50 mm, 闪耀角为63°. 以钠黄光发射峰附近的588 nm作为基准波长, 将入射光线和衍射光线设定在闪耀角附近以提高系统能量利用率, 根据光栅方程, 对于588 nm的光线选择第9级衍射, 将入射角设为51°, 可计算出衍射角为63.52°. 光栅对的间距设为80 mm, 由(14)式可得干涉仪中反射镜偏移量为55.034 mm. 探测器像元大小为6.45 μm, 面阵大小为512 × 512, 成像镜焦距为320 mm, 设计视场角为0.6°. 根据探测器面阵大小, 干涉图双边采样点数为512, 由(15)式可计算出系统对第9级衍射光的光谱范围为588—592.18 nm, 平均光谱分辨率为0.016 nm. 利用光栅的多级衍射特性, 选取光栅的8, 9, 10三级衍射光进行探测, 由(12)式可计算出当光栅工作在第8级和第10级时所对应的基准波长分别为661.5 nm和529.2 nm, 光谱范围为661.5—666.20 nm和529.2—532.96 nm, 平均光谱分辨率为0.018 nm和0.015 nm. 设计的主要参数如表1所列.

上述参数设计中选取了8, 9, 10三个衍射级次的光进行探测, 谱段1工作在第10衍射级, 谱段2工作在第9衍射级, 谱段3工作在第8衍射级. 实际探测过程中为避免其他衍射级次的干扰, 需进行屏蔽. 对于系统内某一工作谱段, 不仅会有所需衍射级次的光经过平行光栅出射, 还会存在其他衍射级次的光经过光栅衍射后射出, 形成杂散光. 为避免杂散光进入探测器, 需在干涉仪内部设置遮光元件, 并在系统光路上设置光阑. 另外, 根据(12)式, 其他谱段的光也可能经过光栅的其他衍射级次在干涉仪中传播, 对于非系统工作谱段的光将由谱段解混中的滤光片或二向色分光镜进行屏蔽, 避免非探测谱段内的光线进入探测器.

表1 设计参数
Table 1. Design parameters.

系统参数		设计值
谱段 1	光谱范围	529.2—532.96 nm
	平均光谱分辨率	0.015 nm
谱段 2	光谱范围	588—592.18 nm
	平均光谱分辨率	0.016 nm
谱段 3	光谱范围	661.5—666.20 nm
	平均光谱分辨率	0.018 nm
光栅	刻线密度	316 lines/mm
	光栅大小	25 mm × 50 mm
	衍射级次	8, 9, 10
	入射角	51°
光学系统	准直镜焦距	200 mm
	成像镜焦距	320 mm
干涉仪	光栅对间距	80 mm
	反射镜偏移量	55.034 mm
探测器	像素大小	6.45 μm × 6.45 μm
	面阵大小	512 × 512

3.2 干涉图计算与光谱复原

根据3.1节参数设定, 计算钠黄光的干涉图像, 钠灯在589 nm和589.6 nm处有两条相近的谱峰, 这两条谱峰落在系统的谱段2范围内即588—592.18 nm. 根据(6)式的干涉图表达式, 计算得到探测器像面的干涉图如图6所示, 截取其中一行得到的干涉图如图7所示.

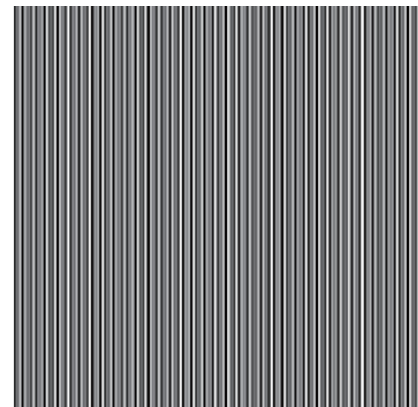


图6 理论计算的钠灯干涉图样

Fig. 6. The theoretical interferogram pattern of the sodium lamp.

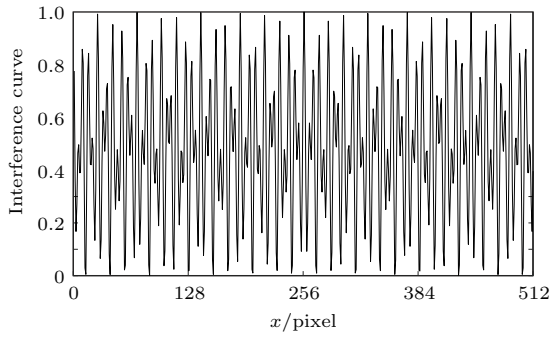


图7 理论计算的钠灯单行干涉图

Fig. 7. One line of the theoretical interferogram for the sodium lamp.

根据(7)式对获取的干涉图进行傅里叶逆变换,并结合驻定相位原理可以复原出输入信号的光谱信息,反演出的原始光谱图如图8所示.

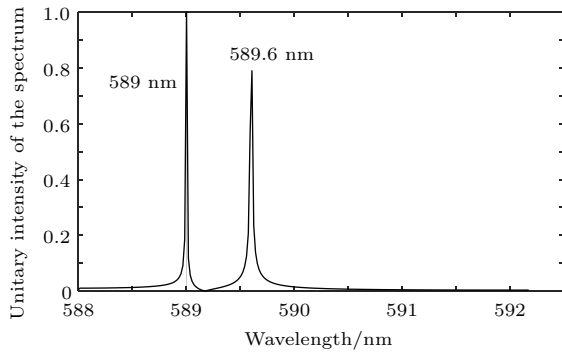


图8 钠灯干涉图反演出的光谱

Fig. 8. Recovered spectrum from the interferogram of the sodium lamp.

由图8可知,理论计算得到的干涉图反演出的光谱准确地将钠灯在589 nm与589.6 nm处的两个峰复原出来,同时,反演出的光谱曲线两个峰之间有36个光谱数据点,由于两个峰之间的波长差为0.6 nm,可大致估计出在此处的光谱分辨率约为0.017 nm,与系统平均光谱分辨率0.016 nm相近.理论计算结果初步验证了系统设计与光谱反演的正确性.

3.3 光学系统建模与仿真

本节将在ZEMAX的非序列模式下建立多波段成像系统的光学系统模型,通过光线追迹得到该模型的干涉图样.

通过ZEMAX建模可以在仪器进行研制前获得干涉图样的仿真图,对系统性能进行评价. ZEMAX中建立的光学系统模型如图9所示,其主要

包括一个分束器(BS),一对平行光栅(Grating 1, Grating 2),两个反射镜(Mirror 1, Mirror 2),成像系统(imaging lens),两个二向色分光镜(dichroic mirror),和三个探测器(detector).平行光栅以及反射镜的位置坐标根据表1的系统结构参数设定.将光栅对设定为多个衍射级次.成像系统首先在ZEMAX的序列模式下进行优化设计,将优化好的320 mm焦距成像系统导入到非序列模式中,组合成多波段成像模型.入射光源选用ZEMAX非序列模式中的Source Two Angle光源,其具有准直光束特性,可以设定准直光束的光束大小与出射方向.利用此准直光源可以省去前置准直光学系统.不同波段的光经过系统后被不同的探测器所采集.

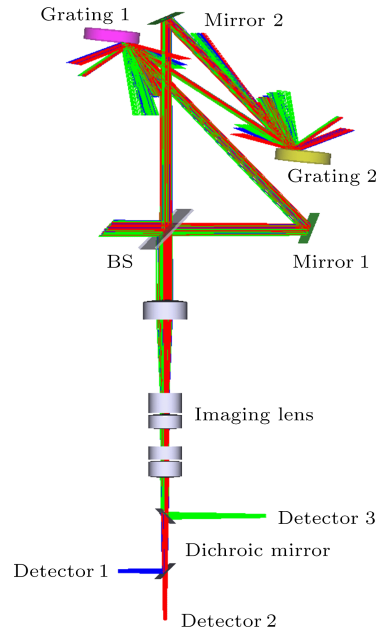


图9 ZEMAX中的光学系统模型

Fig. 9. The optical model setup in ZEMAX.

设定光源的光谱特性为两个波长(589 nm和589.6 nm)的入射光,通过光线追迹的方法,对光源经过系统后的光线进行追迹,可以发现,由于光栅的多级衍射特性,使得光线经过光栅衍射后产生多路衍射光,可通过遮光元件和光阑的设定避免其他杂散光的影响.对于钠灯光源而言,真正被探测到的是光线经过光栅对的第9级衍射光,最后在Detector Viewer中观察探测器上追迹到的光线相干强度.追迹一定时间后,探测器上得到的干涉图样如图10所示.

对比在光学系统模型中光线追迹得到的干涉图样和理论仿真获得的干涉图样可以发现,它们具有相同的空间频率,截取其中某一行的干涉图如图 11 所示.

进一步,对 ZEMAX 中得到的干涉图进行傅里叶逆变换并结合驻定相位原理复原出的光谱如图 12 所示.

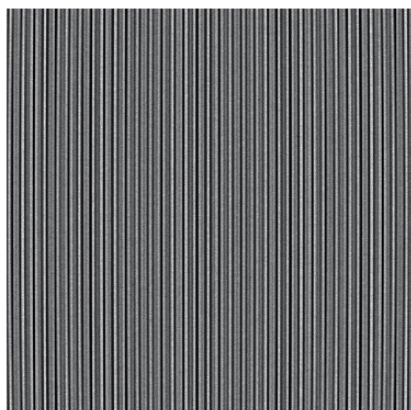


图 10 ZEMAX 光线追迹得到的钠灯干涉图样

Fig. 10. The interferogram pattern of the sodium lamp traced from ZEMAX.

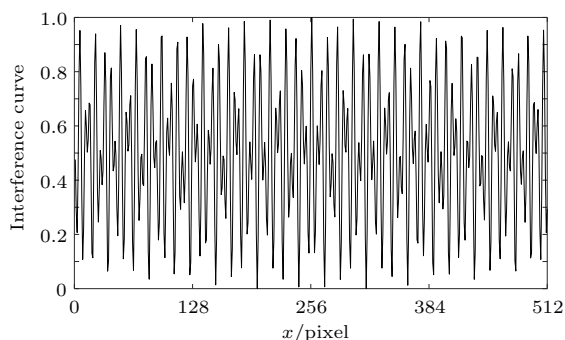


图 11 ZEMAX 光线追迹得到的钠灯单行干涉图

Fig. 11. One line of the interferogram of the sodium lamp traced from ZEMAX.

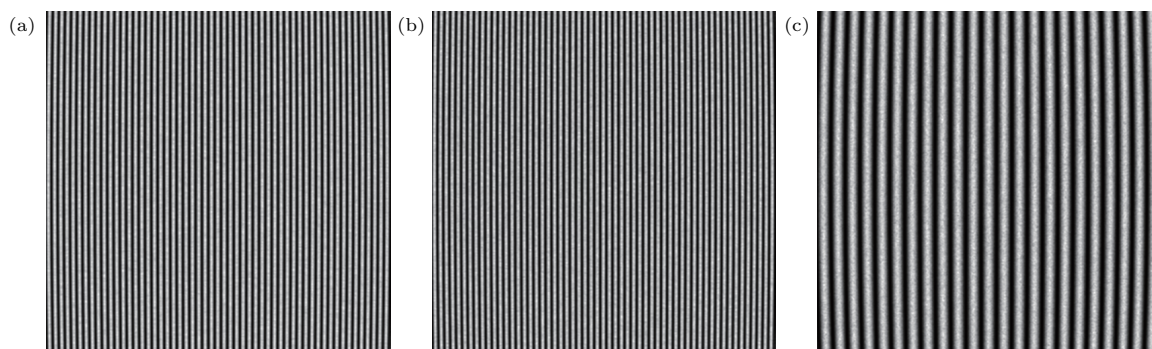


图 13 不同波长干涉图 (a) 530 nm; (b) 589 nm; (c) 662 nm

Fig. 13. Interferogram of different wavelength: (a) 530 nm; (b) 589 nm; (c) 662 nm.

从 ZEMAX 光线追迹得到的干涉图反演出的光谱图中可以看出,其同样将 589 nm 和 589.6 nm 的两个峰复原出来. ZEMAX 光线追迹的结果与理论计算仿真结果的一致性初步验证了多谱段成像技术基本理论的正确性.

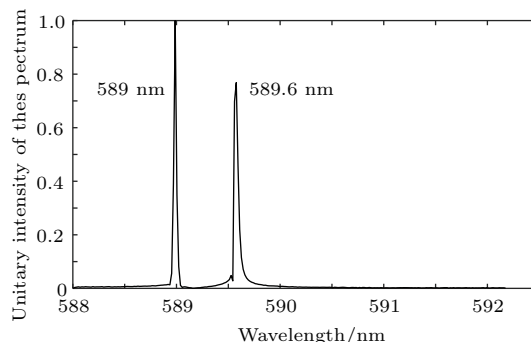


图 12 ZEMAX 中光线追迹干涉图反演出的光谱

Fig. 12. Recovered spectrum from the interferogram traced from ZEMAX.

3.4 多谱段仿真与光谱复原

3.3 节仿真了在 588—592.18 nm 单个谱段的干涉图情况,本节将在三个谱段各设置一个波长,对多谱段情况进行仿真.入射波长设置为 530, 589, 662 nm.此时不同谱段的光线经过干涉仪出射后其干涉图像混叠在一起,利用图 5 所示的二向色分光镜方法将不同谱段的干涉图像分开,不同衍射级次所对应的谱段被不同的探测器所接收.

通过 ZEMAX 光学模型光线追迹得到的在三个不同谱段内三个不同波长的干涉图分别如图 13 所示,提取相应的干涉曲线,进行光谱复原,复原结果分别如图 14 所示.由干涉图光谱复原结果可以看出,三个探测谱段均准确的复原出了入射光谱信息,验证了系统多谱段探测的可行性.

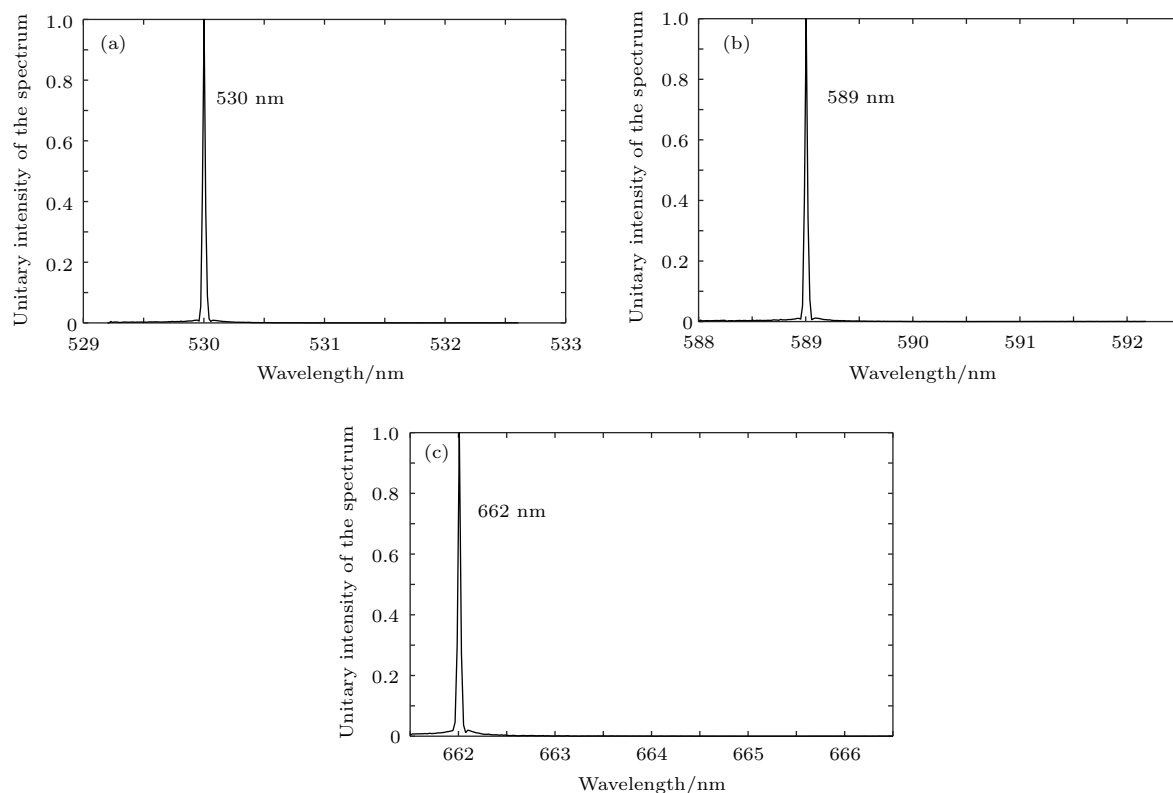


图 14 不同波长干涉图的复原光谱图 (a) 530 nm; (b) 589 nm; (c) 662 nm

Fig. 14. Recovered spectra from the interferogram of different wavelength: (a) 530 nm; (b) 589 nm; (c) 662 nm.

4 结 论

本文提出了一种基于LASHIS技术的多谱段成像技术方案, 其在现有的基于Sagnac干涉仪的LASHIS技术中利用光栅的多级衍射特性, 结合谱段解混, 在保留了LASHIS的高光谱分辨率、高光通量优点的同时, 可以实现多谱段的同时探测, 拓展了系统光谱探测范围. 本文详细论述了系统的基本原理、干涉图表达式、光谱复原方法以及谱段解混方式等关键问题, 给出了设计实例, 并建立了光学系统模型进行干涉图仿真, 仿真结果与理论计算相符合, 验证了方案的正确性与可行性. 基于LASHIS的多谱段成像方案所具有的高光谱分辨率、高探测灵敏度以及可实现同一系统的多谱段同时探测的特点, 尤其适合温室气体等高稳定性、高探测灵敏度的多谱段高光谱探测应用.

参考文献

[1] Roesler F L, Harlander J M 1990 *Proc. SPIE* **1318** 234
 [2] Harlander J M, Roesler F L, Cardon J G, Englert C R, Conway R R 2002 *Appl. Opt.* **41** 1343

[3] Harlander J M, Roesler F L, Englert C R, Cardon J G, Conway R R, Brown C M, Wimperis J 2003 *Appl. Opt.* **42** 2829
 [4] Englert C R, Babcock D D, Harlander J M 2009 *Opt. Eng.* **48** 105602
 [5] Harlander J M, Englert C R, Babcock D D, Roesler F L 2010 *Opt. Express* **18** 26430
 [6] Ye S, Fang Y H, Hong J, Qiao Y L, Xiong W 2007 *Opto-Electron. Eng.* **34** 84 (in Chinese) [叶松, 方勇华, 洪津, 乔延利, 熊伟 2007 光电工程 **34** 84]
 [7] Shi H L, Fang Y H, Xiong W, Luo H Y, Wu J 2010 *J. Atmosph. Environ. Opt.* **5** 463 (in Chinese) [施海亮, 方勇华, 熊伟, 罗海燕, 吴军 2010 大气与环境光学学报 **5** 463]
 [8] Feng Y T, Bai Q L, Wang Y M, Hu B L, Wang S N 2012 *Acta Opt. Sin.* **32** 264 (in Chinese) [冯玉涛, 白清兰, 王咏梅, 胡炳樑, 王姝娜 2012 光学学报 **32** 264]
 [9] Xiong W 2018 *Spacecraft Recov. Remot. Sens.* **39** 14 (in Chinese) [熊伟 2018 航天返回与遥感 **39** 14]
 [10] Xiang L B, Cai Q S, Du S S 2015 *Opt. Commun.* **357** 148
 [11] Cai Q S, Xiang L B, Huang M, Han W, Pei L L, Bu M X 2018 *Opt. Commun.* **410** 403
 [12] Kuze A, Urabe T, Suto H, Kaneko Y, Hamazaki T 2006 *Proc. SPIE* **6297** 62970K
 [13] Kuze A, Suto H, Nakajima M, Hamazaki T 2009 *Appl. Opt.* **48** 6716
 [14] Basilio R R, Pollock H R, Hunyadi-Lay S L 2014 *Proc. SPIE* **9241** 924105

- [15] Crisp D 2015 *Proc. SPIE* **9607** 960702
- [16] Zhang H, Lin C, Zheng Y, Wang W, Tian L, Liu D, Li S 2016 *J. Appl. Remote Sens.* **10** 024003
- [17] Liu Y, Cai Z N, Yang D X, Duan M Z, Lv D R 2013 *Chin. Sci. Bull.* **58** 2787 (in Chinese) [刘毅, 蔡兆男, 杨东旭, 段民征, 吕达仁 2013 科学通报 **58** 2787]
- [18] Yang Z D, Bi Y M, Wang Q, Zheng Y Q, Yin Z S 2016 *Space International* **456** 13 (in Chinese) [杨忠东, 毕研盟, 王倩, 郑玉权, 尹增山 2016 国际太空 **456** 13]
- [19] Liu Y, Lv D R, Chen H B, Yang D X, Min M 2011 *Remote Sens. Technol. Appl.* **26** 247 (in Chinese) [刘毅, 吕达仁, 陈洪滨, 杨东旭, 闵敏 2011 遥感技术与应用 **26** 247]
- [20] Cai Q S 2016 *Ph. D. Dissertation* (Hefei: University of Science and Technology of China) (in Chinese) [才啟胜 2016 博士学位论文 (合肥: 中国科学技术大学)]

Simulation of multiband imaging technology of large aperture spatial heterodyne imaging spectroscopy*

Cai Qi-Sheng[†] Huang Min Han Wei Liu Yi-Xuan Lu Xiang-Ning

(Key Laboratory of Computational Optical Imaging Technology, Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

(Received 12 May 2018; revised manuscript received 15 August 2018)

Abstract

A multiband imaging technology based on large aperture spatial heterodyne imaging spectroscopy (LASHIS) is proposed in this paper. It retains the advantages of high spectral resolution, high stability and high detection sensitivity of LASHIS. In addition, by using the multistage diffraction gratings, several spectral bands can be detected simultaneously in this system, thus the spectral range is broadened. The basic principle of this multiband imaging technology based on LASHIS is described. The difference between optical path differences produced by the Sagnac lateral shearing interferometer and the parallel gratings is calculated. The mathematical expressions, the interferogram calculation procedures, and the spectrum reconstruction method are presented. As a pair of multistage diffraction gratings is introduced into the Sagnac interferometer, the rays of different diffraction orders corresponding to different spectral bands are mixed together in the interferometer. The spectral bands should be separated before they are imaged on the detector. Two separation methods are proposed: introducing a filter array in front of the detector and introducing dichroic mirrors to assign different spectral bands to different detectors. Finally, a design example is given and an optical model is setup in ZEMAX. In this example, a pair of parallel echelon gratings with 316 lines/mm is introduced into the Sagnac interferometer. Two dichroic mirrors and three detectors are used to separate and detect three spectral bands simultaneously. The three spectral ranges are from 529.2 nm to 532.96 nm, from 588 nm to 592.18 nm, and from 661.5 nm to 666.20 nm. The average spectral resolutions are 0.015 nm, 0.016 nm, and 0.018 nm respectively. Two kinds of sources are analyzed: one is a sodium lamp with two emission peaks at 589 nm and 589.6 nm, and the other is a source with three monochromatic wavelengths at 530 nm, 589 nm, and 662 nm. The interferograms of these two sources traced in the optical model are consistent with the theoretical results. The recovered spectra show good agreement with the input spectra. These verified the correctness of the principle and the spectrum reconstruction method. The multiband imaging technology based on LASHIS with the advantages of high spectral resolution, high detection sensitivity, and multiband detection capability, is especially suitable for multiband hyperspectral high stability and high-sensitivity detection, such as the detection of greenhouse gases.

Keywords: Fourier transform spectroscopy, multiband, hyperspectral, spatial heterodyne

PACS: 42.79.-e, 07.60.Rd, 42.25.Hz

DOI: 10.7498/aps.67.20180943

* Project supported by the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2016YFC0201100) and the Innovation Program of Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences (Grant No. Y70B02A11Y).

† Corresponding author. E-mail: caiqs@aoe.ac.cn