

时空联合调制成像光谱仪前置成像系统分析与设计*

王文丛¹⁾²⁾ 梁静秋^{1)†} 梁中翥¹⁾ 吕金光¹⁾
秦余欣¹⁾ 田超¹⁾²⁾ 王维彪¹⁾

1)(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 长春 130033)

2)(中国科学院大学, 北京 100049)

(2013年12月18日收到; 2014年1月5日收到修改稿)

为满足红外成像光谱仪大光通量、高稳定性的应用需求, 提出了一种基于多级阶梯微反射镜的静态化、无狭缝式、新型红外时空联合调制型傅里叶变换成像光谱仪结构. 对其工作原理和光程差的产生方式进行了分析. 作为该成像光谱仪的重要部件, 前置成像系统决定了光程差的分布, 其性能直接影响到目标物体的图像质量. 根据系统光程差的产生方式, 分析和设计了像方远心光路结构的前置成像系统. 利用被动光学消热差方法对前置成像系统进行了消热差研究. 结果表明: 当温度在 $-20\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的范围内时, 各个视场的调制传递函数均达到衍射极限, 在多级阶梯微反射镜的总阶梯高度范围内成像质量良好; 在不同的温度下, 各视场处主光线在像面上的最大入射角小于 0.02° .

关键词: 傅里叶变换成像光谱仪, 光学系统分析与设计, 多级阶梯微反射镜, 中波红外

PACS: 07.57.Ty, 42.25.Hz, 07.60.Ly, 42.30.Kq

DOI: 10.7498/aps.63.100701

1 引言

成像光谱仪是在成像光谱技术基础上发展起来的新一代光学遥感仪器, 是成像仪和光谱仪的有机结合. 它可以获得关于目标物体的三维数据立方体, 已广泛应用于空间遥感、目标探测、地质资源勘探、环境监测、气象分析等领域^[1-5]. 按照工作原理的不同, 成像光谱仪主要可分为色散型和傅里叶变换型两种. 色散型成像光谱仪含有与光谱分辨率有关的狭缝, 因此其在探测可见以及红外弱辐射方面存在一定的困难. 傅里叶变换成像光谱仪是先获取目标物体的干涉信息, 然后对干涉图做傅里叶变换从而获得目标的光谱信息. 按照对干涉图调制方式的不同, 傅里叶变换成像光谱仪主要分为时间调制型、空间调制型和时空联合调制型^[6-8]. 时

间调制型傅里叶变换成像光谱仪基于 Michelson 干涉仪结构, 由精密的动镜驱动机构产生光程差. 空间调制型傅里叶变换成像光谱仪不含可动部件, 利用空间位置的不同产生光程差, 可以实现对迅变物体的光谱测量, 具有较好的实时性, 但其传统结构因含有与空间分辨率相关的狭缝, 从而限制了光通量^[9]. 时空联合调制型傅里叶变换成像光谱仪基于像面干涉成像原理, 不含有狭缝和可动部件, 因此具有光通量大、结构稳定的优点^[10,11].

傅里叶变换成像光谱仪的研制工作已经取得了较大的进展. 1995年, 美国罗伦斯利物摩尔实验室研制出了 Livermore 时间调制型傅里叶变换成像光谱仪样机, 波段范围为 $3.3\sim 4.9\text{ }\mu\text{m}$ 和 $8\sim 12.5\text{ }\mu\text{m}$ ^[12]. 2002年, 美国强力卫星 (Mighty Sat II) 成功发射, 其上搭载了首台星载空间调制

* 国家自然科学基金 (批准号: 61027010, 60977062, 61376122)、吉林省科技发展计划 (批准号: 201205025, 20130206010GX) 和长春市科技计划 (批准号: 2011131, 2013261) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: liangjq@ciomp.ac.cn

型傅里叶变换成像光谱仪 FTHSI, 波段范围为 $0.475\text{--}1.05\ \mu\text{m}$ ^[13]. 2010年, 西安交通大学研制了时空联合调制型偏振干涉成像光谱仪 TSMPIIS, 成功获取了白光的光谱复原信息^[14].

中波红外是成像光谱仪的应用热点之一, 很多有毒有害气体在中波红外波段具有强烈的吸收带. 一些军事目标、航空航天飞行器所排放的尾气、导弹所排出的火焰、企业的高温排污口都会强烈辐射中波红外光谱.

本文提出了一种基于 Michelson 干涉仪基本结构的时空联合调制型中波红外傅里叶变换成像光谱仪, 利用多级阶梯微反射镜取代时间调制型傅里叶变换成像光谱仪的动镜以实现光程差的空间采样. 此系统不含狭缝和可动部件, 因此具有光通量大、结构稳定的优点.

2 基本原理

本文提出的基于多级阶梯微反射镜的时空联合调制型傅里叶变换成像光谱仪的基本结构如图 1 所示. 此系统主要由前置成像光学系统、干涉系统和后置成像光学系统构成. 该系统不含狭缝, 并且采用面阵探测器, 因此其采用窗扫的扫描方式^[15,16]. 该系统为一个二次成像系统, 此成像光谱仪的光程差由多级阶梯微反射镜的阶梯高度所决定. 其基本工作原理为某一时刻地面目标物体发出的光经前置成像系统和分束镜之后分别成像在多级阶梯微反射镜和平面镜上, 由于阶梯高度的存在, 使得成像在多级阶梯微反射镜和平面镜上的两个一次像点产生一个固定的相位差. 两个一次像点作为两个相干的物源经后置成像系统成像后即可获得地面目标物体的图像信息和干涉光强信息. 随着成像光谱仪系统对地面的推扫, 在下一时刻地面目标物体会以另外一个视场角进入系统, 从而成像在相邻的阶梯反射面上. 在一个窗扫模式之内, 就能完成地面目标物体在所有的阶梯反射面上的成像. 通过对多帧图像进行剪切和拼接, 即可获得地面目标物体的图像信息和干涉图信息. 再通过对干涉图进行傅里叶变换, 即可获得地面目标物体的光谱信息.

该成像光谱仪干涉系统的光程差与多级阶梯微反射镜的阶梯高度和视场角有关, 在多级阶梯微反射镜的每一个阶梯面上所产生的光程差是相同

的. 图 2 为第 n 个阶梯反射面和平面镜所对应的成像过程. 其中, A_1 为目标物体在平面镜上所成的像, A_2 为目标物体在平面镜相对于第 n 个阶梯反射面的镜像位置所成的虚像. A_1 和 A_2 作为两个相干的物点经过后置成像系统成像后在红外电荷耦合器件 (CCD) 上发生干涉. 设 d 为多级阶梯微反射镜的阶梯高度, a 为阶梯反射面的宽度, f' 为前置成像系统的焦距, ω_n 为第 n 个阶梯微反射面对应的视场角范围,

$$\omega_n = 2\arctan\left(\frac{a}{f' + nd}\right), \quad (1)$$

在视场角 ω_n 的范围之内, 像点 A_1 和 A_2 之间的光程差 δ 为

$$\delta = 2nd. \quad (2)$$

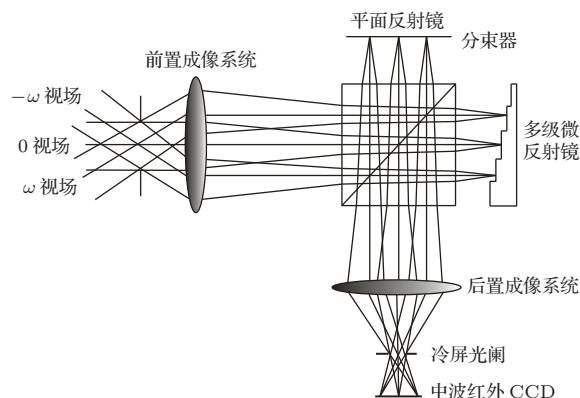


图1 基于多级阶梯微反射镜的时空联合调制型傅里叶变换成像光谱仪结构示意图

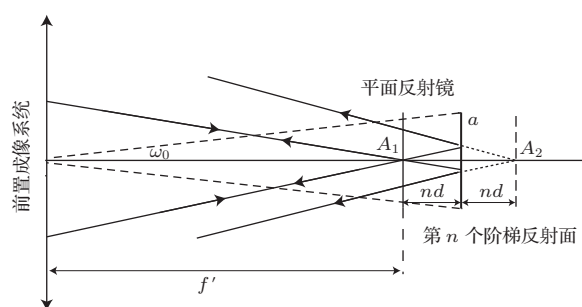


图2 干涉系统的光程差产生示意图

此成像光谱仪不含狭缝, 并且采用面阵探测器, 因此该系统采用窗扫的扫描方式^[14]. 整个系统为一个二次成像系统, 图 3 为一个窗扫模式下一次成像过程的示意图, 图中只给出了五个阶梯反射面. $B_2, B_1, B_0, B_{-1}, B_{-2}$ 分别代表不同时刻相同的地面物点 B 以不同视场进入成像光谱仪的位置; $B'_2, B'_1, B'_0, B'_{-1}, B'_{-2}$ 分别为不同时刻物点 B 在所对应的阶梯反射面上所成的像. 对于多级阶梯微

反射镜阶梯数为 N 的成像光谱仪系统, 其完成一个窗扫过程, 可以获得关于物点 B 的 N 幅对应不同光程差的图像. 取多级阶梯微反射镜的子反射面宽度为 a , 此系统的飞行高度为 H , 则像点 B'_2 与 B'_1 之间的距离为 a , B_2 与 B_1 之间的距离为 Δh , 前置成像系统的焦距 f' 为

$$f' = Ha/\Delta h. \quad (3)$$

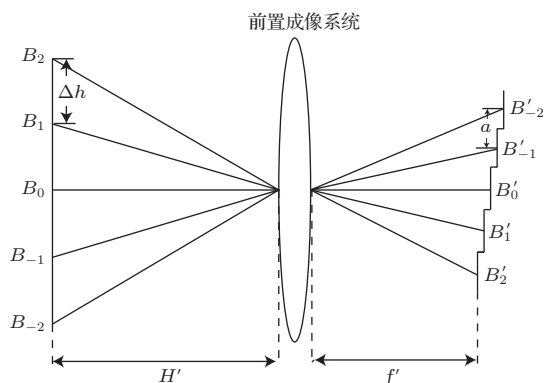


图3 一个窗扫模式下一次成像过程示意图

图4为一个窗扫模式下系统二次成像过程示意图. 从图4可以看出, 一个物体在 CCD 上所对应的像点在不同时刻的变化情况, 其中☆代表物体在 CCD 上所成的像, Δt 为成像光谱仪对同一目标物体进行拍摄取样的时间间隔. 图4只给出了面阵 CCD 上的某一行在不同时刻的成像情况. 当物体进入一个扫描窗时, 成像点位于 CCD 一行中最右边的像素点. 随着成像光谱仪向前推扫, CCD 上的成像点位置向左平移. 经过一个窗扫过程之后, 成像点移动到 CCD 一行中最左边的像素点. 经过一个窗扫过程, 可以获得 N 幅图像. 将这 N 幅图像进行剪切和拼接就可以得到这一物体的干涉图. 对干涉图进行傅里叶变换可获得这一物体的光谱信息^[17].

3 前置成像光学系统分析与设计

成像光谱仪的光学系统主要包括前置成像系统、干涉系统和后置成像系统三部分组成. 由于成像光谱仪采用二次成像系统, 因此前置成像系统的性能直接影响最终在 CCD 上获得的物体成像质量. 前置成像物镜的主要作用是将不同视场的目标物体经分束系统后分别成像在多级阶梯微反射镜的不同阶梯反射面和平面镜的对应区域上, 因此前置

成像物镜的视场角要保证多级阶梯微反射镜的所有阶梯反射面都能接收到物体的像. 为了保证同一阶梯反射面上所产生的光程差相同, 目标物体不同视场的主光线经前置成像系统之后应垂直于多级阶梯微反射镜和平面镜. 成像光谱仪系统中的分束器使前置成像物镜的出射光经分束后形成反射和透射两个等效成像光路, 因此只需对透射成像光路做分析即可.

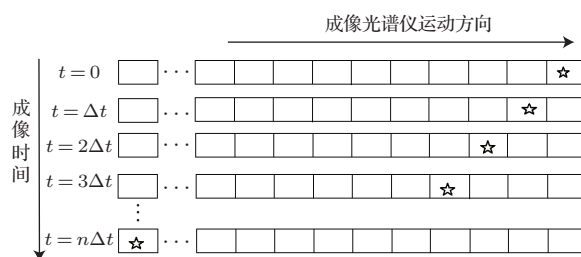


图4 一个窗扫模式下二次成像过程示意图

3.1 前置成像系统作用分析

前置成像系统的作用是在一个窗扫模式下将同一目标物体在不同时刻成像于多级阶梯微反射镜的不同反射面和平面镜上, 由此形成光程差分布. 由对图2的分析可知, 在每一个阶梯反射面所对应的视场角 ω_n 范围内, 该成像光谱仪干涉系统所产生的光程差相等, 因此要求前置成像系统各个视场的主光线均垂直于多级阶梯微反射镜的表面, 故前置成像系统采用像方远心光路结构.

当前置成像系统某一视场的主光线不垂直于多级阶梯微反射镜的表面 (图5) 时, 即成像在第 n 个阶梯反射面的某一视场主光线在多级阶梯微反射镜上的入射角为 α , 若 α 大于每个阶梯反射面所对应的视场角 ω_n 的二分之一时, 使得原来成像在第 n 个阶梯反射面上的像点成像在其相邻的第 $n-1$ 个阶梯反射面上, 从而导致最终获得的物体干涉图信息缺级, 成像光谱仪系统的光谱分辨率降低, 并且会给后期的数据处理带来困难. 因此各个视场的主光线在阶梯反射面的入射角 α 要满足以下要求:

$$\alpha \leq \frac{\omega_n}{2}. \quad (4)$$

目标物体经前置成像系统之后分别成像在平面镜和多级阶梯微反射镜的各个阶梯反射面上. 为了保证在各个阶梯反射面上都能清晰获得目标物体的像, 需对前置成像系统的视场角提出要求. 以多级

阶梯微反射镜的对角线 h 为基准, 前置成像系统总的视场角 $2w$ 为

$$2w = 2 \arctan \left(\frac{h}{2f'} \right). \quad (5)$$

3.2 前置成像系统消热差分析

红外光学材料对温度变化十分敏感. 当环境温度发生变化时, 首先影响的是透镜材料的折射率, 其次是曲率半径和厚度, 这会使红外光学系统的成像质量受到很大的影响, 因此一般都要要求在 $-20 \sim 60^\circ\text{C}$ 的温度范围内红外光学系统具有良好的成像质量^[18].

在红外光学系统的无热化设计方法中, 电子主动补偿方法和机械被动补偿方法需引入额外的补偿机构, 使得系统体积变大. 而光学被动式无热化设计方法通过匹配各个光学元件的折射率温度系数和热膨胀系数, 使得各个光学元件由温度产生的焦移得到相互补偿或者消除, 从而使得一定温度范围内系统的成像质量达到可以接受的水平. 红外光学系统的光学被动式无热化设计需满足以下两个公式:

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \cdots + \varphi_n, \quad (6)$$

$$T = \frac{\varphi_1}{\varphi} T_1 + \frac{\varphi_2}{\varphi} T_2 + \frac{\varphi_3}{\varphi} T_3 + \cdots + \frac{\varphi_n}{\varphi} T_n, \quad (7)$$

其中, $\varphi_1, \varphi_2, \cdots, \varphi_n$ 为红外光学系统各个光学元件的光焦度; $T_1, T_2, \cdots, T_n$ 为各个光学元件所产生的热像差. 红外光学系统光学被动式无热化设计就是通过合理分配各个光学元件的光焦度, 匹配光学元件的热膨胀系数和折射率温度系数, 从而使得光学系统所产生的总热像差 T 最小. 目前国内红外光学系统采用最多的无热化光学材料主要有 Si, Ge 和 ZnSe^[19], 而 Si 和 Ge 又是中波红外光学成像系统消除色差最好的材料. 因此本文前置成像系统采用 Si 和 Ge 光学材料以消除色差, 与分束

器结合降低热像差. 镜筒选取铝材料, 热膨胀系数为 $23.6 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$, 从而使得在 $-20 \sim 60^\circ\text{C}$ 的温度范围内前置成像系统实现良好的成像质量, 并且保证各个视场的主光线与像面的入射夹角不超过 $\omega_n/2$.

3.3 前置成像系统的设计参数及设计结果

在干涉系统的透射光路中, 分束器相当于一个平行玻璃板, 当其处于非平行光路中时, 会产生除场曲以外的所有像差^[20]. 当进入分束器的光线的孔径角较大时, 会产生较大的球差和位置色差. 进入分束器的光线的视场角较大时, 会产生较大的像散、畸变以及倍率色差, 而彗差的产生与孔径角和视场角都有关系. 前置成像系统的设计需要综合考虑分束器和前置成像系统, 通过优化前置成像物镜来消除分束器产生的各种像差.

由上述分析可知, 前置成像系统采用像方远心光路结构, 各个视场的主光线在像面上的入射角要小于每个阶梯反射面所对应的视场角的二分之一. 将相关数据代入 (1) 和 (4) 式, 可以得出各个视场主光线的像面入射角需小于 0.2019° .

以多级阶梯微反射镜的对角线长度作为视场角基准, 本文设计的前置成像系统的波长范围为 $3 \sim 5 \mu\text{m}$, 半视场角 $w = 6.46^\circ$, 焦距 $f' = 200 \text{ mm}$, 光圈数 F 为 3.5, 并且各视场主光线像面入射角小于 0.2019° , 在 $-20 \sim 60^\circ\text{C}$ 的温度范围内成像质量良好.

本文设计的前置成像系统采用四片式透射结构, 如图 6 所示, 前置成像系统的入瞳位于第一片镜子的前面, 以形成像方远心光路结构. 其中第三片镜子的前表面采用非球面结构, 用以消除系统的高级像差, 减小系统的镜片数量, 其非球面系数 $k = -0.12$.

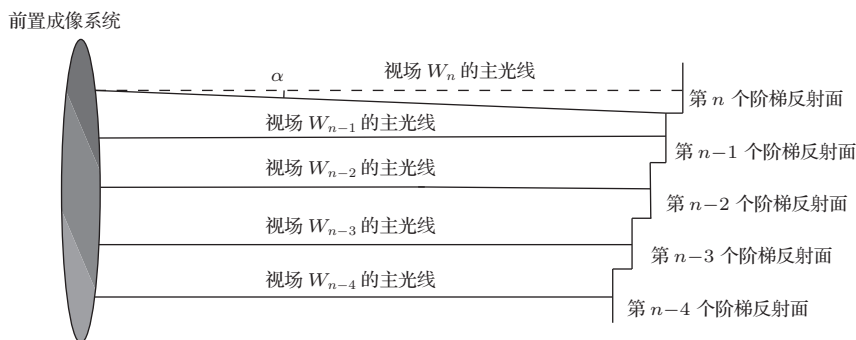


图5 前置成像系统主光线偏离示意图

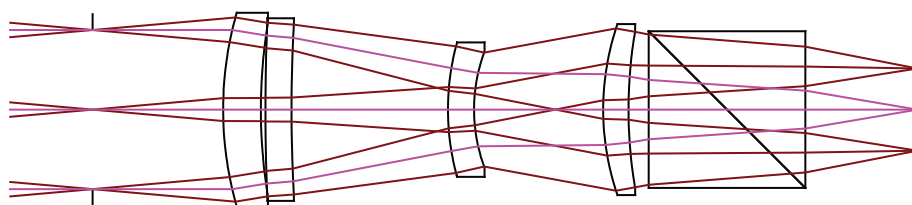
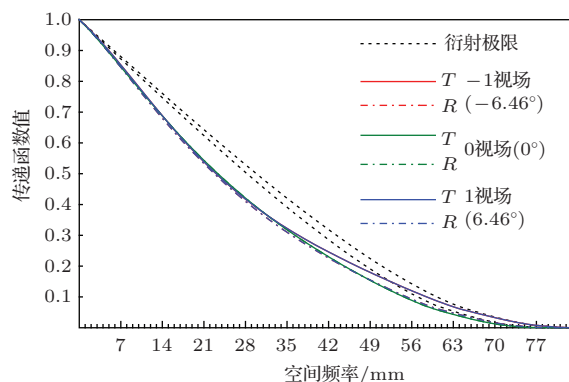
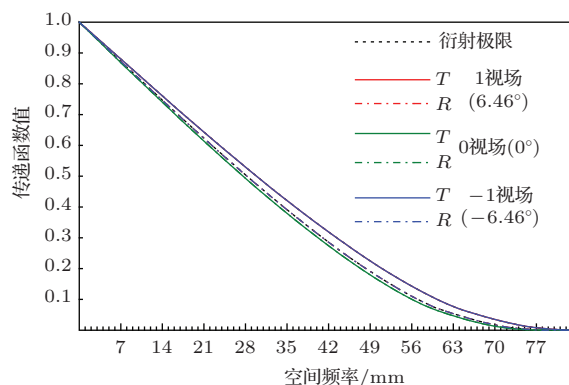
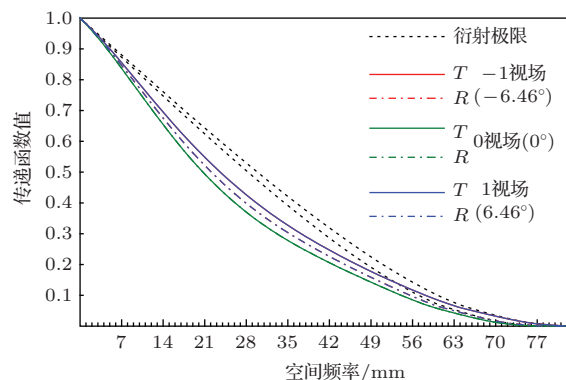
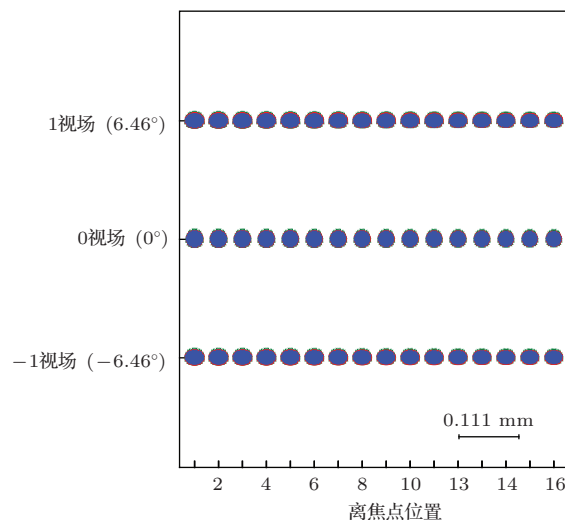
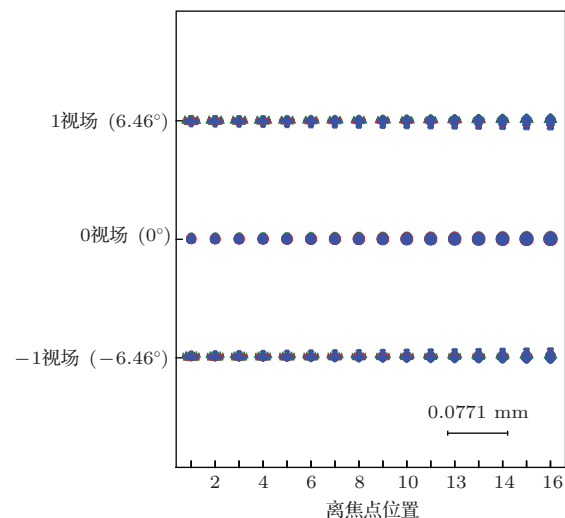


图6 前置成像系统结构图

图7—图9分别给出了当温度为 -20 、 20 和 60 $^{\circ}\text{C}$ 时, 前置成像系统的调制传递函数 (MTF) 曲线, T 和 R 分别代表切向传递函数和径向传递函数, 选取 3700 , 4000 , 4800 nm 三个参考波长设计前置成像系统, 权重为1. 由图7—图9可知, 不同温度下前置成像系统全部视场的 MTF 曲线均接近衍射极限.

图7 (网刊彩色) -20 $^{\circ}\text{C}$ 时前置成像系统的 MTF 曲线图8 (网刊彩色) 20 $^{\circ}\text{C}$ 时前置成像系统的 MTF 曲线

由于前置成像系统的作用是将目标物体成像在平面镜和多级阶梯微反射镜上, 因此要求前置成像系统在多级阶梯微反射镜的阶梯高度范围内成像质量良好. 由于多级阶梯微反射镜的阶梯数为32, 前置成像系统为旋转对称系统, 因此前置成像系统取16个离焦点, 每个离焦点的间隔为一个多级阶梯微反射镜的阶梯高度. 图10—图12分别给

图9 (网刊彩色) 60 $^{\circ}\text{C}$ 时前置成像系统的 MTF 曲线图10 -20 $^{\circ}\text{C}$ 时前置成像系统的离焦点列图图11 20 $^{\circ}\text{C}$ 时前置成像系统的离焦点列图

出了温度为 -20 、 20 和 60 °C时前置成像系统的离焦点列图. 由图10—图12可知, 在不同温度下, 在多级阶梯微反射镜的总阶梯高度范围之内, 前置成像系统成像质量良好. 在这三个温度下, 前置成像系统光斑直径的最大均方根值分别为 18.3 、 3.56 、 21.1 μm .

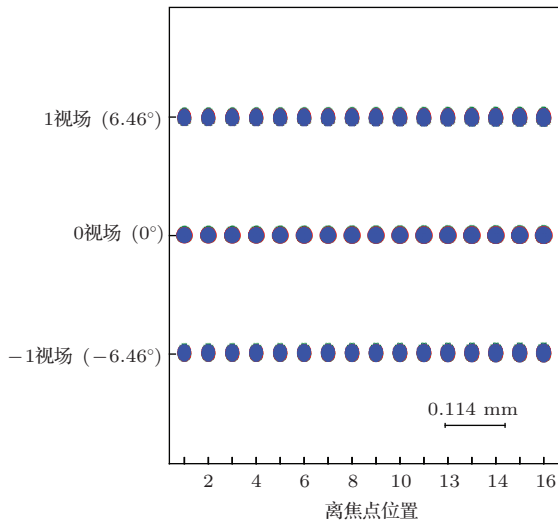


图12 60 °C时前置成像系统的离焦点列图

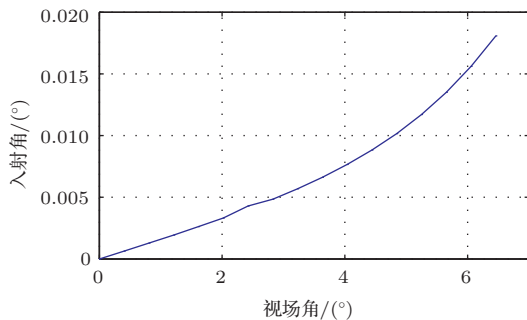


图13 -20 °C时前置成像系统各视场主光线像面入射角

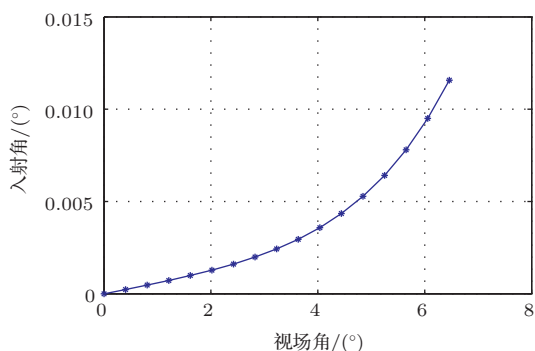


图14 20 °C时前置成像系统各视场主光线像面入射角

由上述分析可知, 采用像方远心光路结构的前置成像系统要求各个视场与像面的入射角均小于 0.2019° . 图13—图15分别给出了温度为 -20 、 20

和 60 °C时前置成像系统各视场主光线像面入射角. 由图13—图15可知, 在不同温度下, 前置成像系统各视场与像面的最大入射角均小于 0.02° .

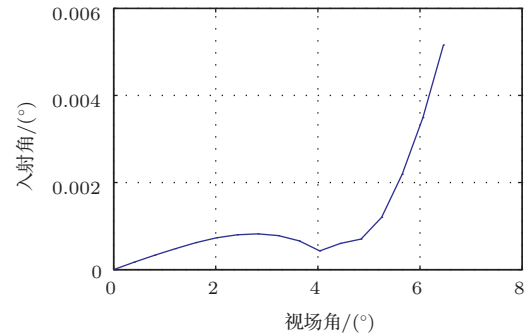


图15 60 °C时, 前置成像系统各视场主光线像面入射角

4 结 论

本文提出了一种基于多级阶梯微反射镜的时空联合调制新型傅里叶变换红外成像光谱仪结构. 该成像光谱仪利用多级阶梯微反射镜代替时间调制型傅里叶变换成像光谱仪的动镜, 且不含有狭缝, 故此系统结构稳定, 光通量大. 对此成像光谱仪系统的工作原理和光程差的产生方式进行了分析, 得出了系统光程差的具体表达式. 根据系统光程差的产生方式, 分析了前置成像系统各个视场的主光线与像面的入射角, 最终得出其应小于每个阶梯反射面所对应的视场角的一半. 根据系统的工作方式对该成像光谱仪的前置成像系统进行了分析和设计. 结果表明, 在 -20 — 60 °C的温度范围内, 前置成像系统成像质量良好, 各个视场的MTF都达到了衍射极限, 不同温度下各个视场的主光线在像面的最大入射角均小于 0.02° .

参考文献

- [1] Edward D, Xiao W X, Alexander P, Min Y S 2011 *Appl. Opt.* **50** 5351
- [2] Macro P, Massimo Z 2009 *Opt. Express* **17** 8391
- [3] Yann F, Jean T, Hervé S, Pierre C, Pierre F, Christophe C, Joël D, Jérôme P 2011 *Appl. Opt.* **50** 5894
- [4] Michael W K, Eustace L D 2012 *Opt. Express* **20** 17973
- [5] Pantazis M, Glenn S R R, Daniel W W, James J S, Robert O G 2007 *Opt. Eng.* **46** 063001
- [6] Ting K M, Chun M Z, Wen Y R, Chen L J 2012 *Opt. Lett.* **37** 3507

- [7] Dong Y, Xiang L B, Zhao B C 2001 *Acta Opt. Sin.* **21** 330 (in Chinese) [董瑛, 相里斌, 赵葆常 2001 光学学报 **21** 330]
- [8] Li Y P, Yu B X, Han C Y, Li Z 2006 *Opt. Precis. Eng.* **14** 974 (in Chinese) [李幼平, 禹秉熙, 韩昌元, 李柱 2006 光学精密工程 **14** 974]
- [9] Sun Y, Zhang C M, Du J, Zhao B C 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 3863 (in Chinese) [孙尧, 张淳民, 杜鹃, 赵葆常 2010 物理学报 **59** 3863]
- [10] Wu J F, Zhang C M 2010 *Chin. Phys. B* **19** 034201
- [11] Zhang C M, Ren W Y, Mu T K 2010 *Chin. Phys. B* **19** 024202
- [12] Charles L B, Michael R C, David J F 1995 *Proc. SPIE* **2552** 275
- [13] Ana E, Joshua L, Andrew M 2002 *Proc. SPIE* **4480** 186
- [14] Yan X G, Zhang C M, Zhao B C 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 3123 (in Chinese) [严新革, 张淳民, 赵葆常 2010 物理学报 **59** 3123]
- [15] Jian X H, Zhang C M, Zhu B H, Ren W Y 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 6131 (in Chinese) [简小华, 张淳民, 祝宝辉, 任文艺 2010 物理学报 **59** 6131]
- [16] Zhang C M, Huang W J, Zhao B C 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 5479 (in Chinese) [张淳民, 黄伟健, 赵葆常 2010 物理学报 **59** 5479]
- [17] Yuan Z L, Zhang C M, Zhao B C 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 6413 (in Chinese) [袁志林, 张淳民, 赵葆常 2007 物理学报 **56** 6413]
- [18] Qu H M, Zhang X, Wang L J, Zhang J Z 2012 *Acta Opt. Sin.* **32** 0322003 (in Chinese) [曲贺盟, 张新, 王灵杰, 张继真 2012 光学学报 **32** 0322003]
- [19] Chang H 2011 *Ph. D. Dissertation* (Harbin: Harbin Institute of Technology) (in Chinese) [常虹 2011 博士学位论文 (哈尔滨: 哈尔滨工业大学)]
- [20] Zhang Y M 2008 *Applied Optics* (Beijing: Publishing House of Electronics Industry) p321 (in Chinese) [张以谟 2008 应用光学 (北京: 电子工业出版社) 第321页]

Design and analysis for the front imaging optical system of the spatiotemporal mixed modulated Fourier transform imaging spectrometer*

Wang Wen-Cong¹⁾²⁾ Liang Jing-Qiu^{1)†} Liang Zhong-Zhu¹⁾ Lü Jin-Guang¹⁾
Qin Yu-Xin¹⁾ Tian Chao¹⁾²⁾ Wang Wei-Biao¹⁾

1) (State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

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

(Received 18 December 2013; revised manuscript received 5 January 2014)

Abstract

In order to satisfy the application requirements of the large flux and the high stability for the infrared imaging spectrometer, we propose a new type of static no-slit spatiotemporally mixed modulated Fourier transform imaging spectrometer based on the multi-level micro-mirrors. The working process and the generation manner of optical path difference of the system are analyzed. The front imaging system, as an important component of the imaging spectrometer, determines the distribution of the optical path difference, and its performance directly affects the image quality of target object. According to the generation manner of optical path difference of the system, the front imaging system for the telecentric structure in the image space is analyzed and designed. The athermalization design research is carried out by means of the passive optical elimination thermal difference. The result shows that the modulation transfer function curve of each field reaches the diffraction limit in a temperature range of $-20-60\text{ }^{\circ}\text{C}$. The front imaging optical system has a good imaging quality in the total step height of the multi-step micro-mirrors. At different temperatures, the maximum incident angle on the image surface is less than 0.02° for the principal ray of each field.

Keywords: Fourier transform imaging spectrometer, optical system design and analysis, multi-level micro-mirrors, medium wave infrared

PACS: 07.57.Ty, 42.25.Hz, 07.60.Ly, 42.30.Kq

DOI: 10.7498/aps.63.100701

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61027010, 60977062, 61376122), the Science and Technology Development Program of Jilin Province, China (Grant Nos. 201205025, 20130206010GX), and the Science and Technology Program of Changchun, China (Grant Nos. 2011131, 2013261).

† Corresponding author. E-mail: liangjq@ciomp.ac.cn