

AOTF 后楔角对光谱图像像质的影响

徐泽夫¹, 赵慧洁^{1,2}, 贾国瑞^{1,2*}

- (1. 北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191;
2. 北京航空航天大学“精密光机电一体化技术”教育部重点实验室, 北京 100191)

摘要: 针对 AOTF 成像光谱仪的光谱图像退化程度难以量化评价的问题, 提出了包含后楔角影响的 AOTF 器件调制传递函数 (MTF) 定量计算方法。该方法通过建立 AOTF 的光谱-空间维响应模型获取 AOTF 器件的线扩散函数 (LSF), 然后通过线扩散函数傅里叶变换得到理论 MTF。在验证实验中, 截止频率内的 MTF 理论值与实测值相对偏差小于 15%, 可以为 AOTF 的像质评估提供理论依据。进而, 通过该定量计算方法讨论不同 AOTF 后楔角对光谱图像像质的影响。通过仿真分析得出, AOTF 的后楔角难以同时满足横向色差校正与图像退化抑制, 需要根据实际应用对于空间分辨率以及横向色差的要求进行取舍。所以, 针对 AOTF 不同后楔角进行光谱图像像质的定量分析对于评估 AOTF 光谱图像像质具有重要意义, 为 AOTF 器件设计提供了理论依据。

关键词: 声光可调谐滤波器; 后楔角; 光谱成像

中图分类号: O439; TP731 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20210590

Influence of the AOTF rear cut angle on spectral image quality

Xu Zefu¹, Zhao Huijie^{1,2}, Jia Guorui^{1,2*}

- (1. School of Instrumentation and Optoelectronic Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;
2. Key Laboratory of "Precision Opto-mechatronics Technology" Ministry of Education, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: Spectral image degradation is a common problem of acousto-optic tunable filter (AOTF) imaging spectrometers, and it is difficult to quantitatively predict. To quantitatively evaluate the image quality of spectral images, a modulation transfer function (MTF) calculation method including the influence of the AOTF rear cut angle is proposed. In this method, the line spread function (LSF) of the AOTF device is obtained by establishing the spectrum-space dimension response model of the AOTF, and then the theoretical MTF is obtained by Fourier transform of the line spread function. In the validation experiment, the deviation between the measured MTF value and the theory is less than 15% within the cut-off frequency. It is a theoretical basis for image quality evaluation of the AOTF. Furthermore, the influence of different AOTF rear cut angles on spectral image quality is discussed by this quantitative method. After simulation, it is concluded that the rear cut angle of the AOTF has difficulty meeting the requirements of lateral chromatic aberration and image sharpness at the same time. The cut angle needs to be selected according to the requirements of practical application. Therefore, it is significant to

收稿日期: 2021-08-20; 修订日期: 2021-09-16

基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFB0500505); 国防基础科研计划 (JCKY2019601C101); 国家自然科学基金 (61227806)

作者简介: 徐泽夫, 男, 博士生, 主要从事 AOTF 器件建模以及 AOTF 成像光谱仪系统集成方面的研究。

导师简介: 赵慧洁, 女, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事高光谱遥感、三维测量等方面的研究。

通讯作者: 贾国瑞, 男, 副教授, 博士生导师, 博士, 主要从事高光谱成像建模、仿真和数据预处理等方面的研究。

evaluate the image quality of AOTFs with different rear cut angles. The method is an important theoretical basis for AOTF device design.

Key words: acousto-optic tunable filter; rear cut angle; spectral imaging

0 引言

声光可调谐滤波器 (AOTF) 是一种电控可调谐的分光器件, 在凝视型成像光谱探测领域已有较多成功的应用^[1-5]。AOTF 器件的性能参数与 AOTF 器件的设计参数相关, 所以建立 AOTF 器件的响应模型可以在设计阶段进行性能指标估计, 为实际应用需求提供保障。为了描述 AOTF 器件的响应特性, 科研人员在 AOTF 调谐曲线关系、光谱传输函数等方面已开展了很多研究。例如, Chang^[6]、Yano^[7] 以及 Gass^[8] 等人最早开展了 AOTF 光谱传输函数与调谐曲线关系的研究, Voloshinov、Krauz^[9-11] 等人也对 AOTF 光谱传输函数以及不同晶体材料的光谱响应进行了分析。Gorevoy^[12] 讨论了不同入射角下 AOTF 光谱响应的变化, Mantsevich^[13] 讨论了温度对调谐曲线的影响, Chang^[14] 讨论了双 AOTF 级联对光谱响应的影响。所以, 对光谱维的 AOTF 响应已经有了较为成熟的研究。但是与此同时, 对于光谱成像应用, AOTF 器件由于其声光作用还会产生图像退化, 主要体现在声光互作用方向上, 使得子午与弧矢方向的光学空间分辨率不一致。这种图像退化不仅影响了光谱图像的空间分辨率, 也让临近像元的光谱产生了串扰, 即相邻像元的光谱混叠。但目前这方面的定量计算还相对缺乏, 主要的研究集中在基于定性分析的工程抑制方法上。例如, 针对图像退化分别提出了远心共焦光路^[15]、光谱图像复原方法^[16]、增加换能器长度^[17]、AOTF 级联^[18] 等方式来获得更清晰的图像。但是以上几种方式都有一定的局限性。远心共焦光路尽管图像退化抑制较好, 但是同时会带来光谱带宽展宽且轴向色差不易抑制的问题。光谱图像复原方法在图像退化程度较小时会有比较好的复原效果, 但是当图像退化程度较严重时, 高频分量严重丢失, 该方法并不能很好的还原出截止频率以外的高频信息。增加换能器长度和 AOTF 级联的方式都是通过减小光谱带宽的方式, 使图像变得更为锐利, 但是这两种方法会抑制 AOTF 的辐通量, 使得系统信噪比降低。为了寻求更好的图像退化抑制方法, 目前有研究发现改变

AOTF 后楔角可以抑制准直光路中的图像退化现象^[19], 这说明 AOTF 后楔角的不同也会引起 AOTF 器件的调制传输函数 (MTF) 改变。但是, AOTF 后楔角的改变对像质的影响还缺少定量计算方法。目前公开文献中, 对于 AOTF 空间维响应的定量计算主要是 Machikhin^[20] 在研究中指出 AOTF 器件由于声光作用存在畸变的影响, 但该研究未讨论 AOTF 器件的图像退化问题。Voloshinov^[21] 讨论了 AOTF 晶体内部的带宽内衍射光衍射角漂移, 但该计算进行了大量线性近似, 并且并未计算晶体内衍射光经过后楔角后的角漂移量。

综上所述, 现有的国内外研究主要针对 AOTF 器件的调谐曲线、光谱响应函数进行了分析, 对于空间维响应的定量计算较少, 对于考虑后楔角的 AOTF 像质评估更是缺乏。为了能够在 AOTF 设计阶段定量计算 AOTF 器件后楔角对像质的影响, 文中提出了不同波长下 AOTF 器件的光学调制函数计算方法, 用以评估不同后楔角下的像质变化。该方法为 AOTF 器件优化减小工程迭代成本提供了依据, 也为提高 AOTF 成像系统总体设计的效率提供了可能性。

1 声光作用原理

声光效应主要有三种不同的分类方式^[22]: 据入射光与衍射光的偏振特性分, 可以分为正常声光效应与反常声光效应两类。正常声光效应中衍射光的偏振方向与入射光相同, 而反常声光效应中衍射光的偏振方向与入射光不同。根据声波传输的不同分为表面波以及体波声光效应两类。根据声光互作用长度分类, 可以分为拉曼奈斯声光效应与布拉格声光效应。AOTF 是一种基于声光效应的带通滤光片, 属于反常声光效应中的布拉格衍射体波器件, 具有入射光与出射光偏振态不同, 声光互作用长度较长, 主要产生 ± 1 级衍射光, 声波在晶体内传输等特性。目前, 在可见光到短波红外范围内主要采用的声光材料是二氧化碲 (TeO_2) 晶体。

AOTF 声光作用需要满足晶体内的“声光栅”与入

射光产生动量匹配^[6],使得入射光波矢与声波矢满足几何约束关系,如图 1 所示。

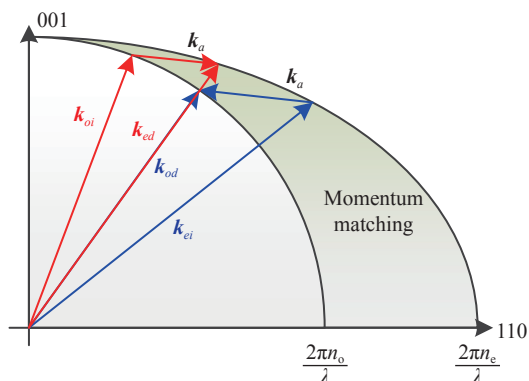


图 1 动量匹配的波矢量布局图

Fig.1 Wave vector layout of momentum matching

图 1 中的矢量关系可以表述为公式 (1)。当入射光为 O 光时,则满足如图 1 中红色矢量的约束,当入射光为 E 光时,则满足图 1 中蓝色矢量的约束。

$$\mathbf{k}_i \pm \mathbf{k}_a = \mathbf{k}_d \quad (1)$$

式中: $|\mathbf{k}_i| = \frac{2\pi n_i}{\lambda}$, $|\mathbf{k}_d| = \frac{2\pi n_d}{\lambda}$, $|\mathbf{k}_a| = \frac{2\pi f_a}{V_a}$, λ 为波长, n_i 与 n_d 分别为入射光以及衍射光波矢量方向的折射率, f_a 与 V_a 分别为声波频率与声波相声速。

2 AOTF 器件 MTF 定量计算方法与验证结果

2.1 理论方法

AOTF 成像光谱仪获取的光谱图像质量取决于两个因素。一是光学系统的口径限制了衍射极限,且光学系统本身存在几何像差,该部分与成像光谱仪光学设计参数相关,可根据光学系统设计参数用光学设计商业软件进行 MTF 计算,文中不予讨论;二是由于 AOTF 器件自身的声光作用导致光谱图像在子午方向和弧矢方向的锐利程度不一致。由于 AOTF 声波矢量的方向并不单一,当入射光与理想声矢量不满足动量匹配时,依旧会有声光作用产生,引起光谱图像像质退化,此时的波矢量布局图如图 2 所示。

图 2 波矢量布局图中的入射光矢量与波矢面产生交点,计算得到入射光波矢末端的坐标 (x_c', y_c', z_c') , 其中, $x_c' = 0$, (y_c', z_c') 由公式 (2) 计算,沿着 110 轴为 y 轴,沿着 001 轴为 z 轴:

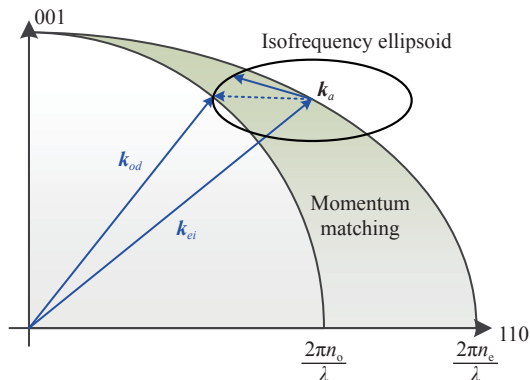


图 2 非理想声束的声光相互作用

Fig.2 Acousto-optic interaction of non ideal sound beam

$$\begin{cases} \frac{y_c'^2}{n_e^2} + \frac{z_c'^2}{n_o^2} = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 \\ \frac{y_c'}{M_1} = \frac{z_c'}{N_1} \end{cases} \quad (2)$$

式中: n_e, n_o 分别为双折射晶体 110 轴 E 光折射率与 O 光折射率; M_1, N_1 分别为入射光向量的 y 轴和 z 轴方向余弦。在确定入射光矢量后,入射光矢量与非理想声矢量产生声光作用,从而确定晶体内的衍射光矢量方向。根据波矢量布局的几何关系约束,可得到晶体衍射光出射角的隐式解析表达,如公式 (3) 所示:

$$\begin{cases} \frac{y'^2}{n_o^2} + \frac{z'^2}{n_o^2} = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 \\ \frac{(y' - y_c')^2}{\left(\frac{2\pi f_a}{V_t}\right)^2} + \frac{(z' - z_c')^2}{\left(\frac{2\pi f_a}{V_z}\right)^2} = 1 \end{cases} \quad (3)$$

式中: (y', z') 为非理想声矢量末端坐标; f_a 为声频率; V_t, V_z 分别为声波沿着晶体 110 轴以及 001 轴的相速度。以 E 光进 O 光出的 AOTF 为例,根据波矢面圆球的约束,在 yoz 平面上 z' 可以表示为:

$$z' = \sqrt{\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 n_o^2 - y'^2} \quad (4)$$

将 z' 代入等声频率椭球的公式,则求解等声频率椭圆与波矢面圆球的交点问题变为求解方程:

$$\frac{(y' - y_c')^2}{\left(\frac{2\pi f_a}{V_t}\right)^2} + \frac{\left(\sqrt{\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 n_o^2 - y'^2} - z_c'\right)^2}{\left(\frac{2\pi f_a}{V_z}\right)^2} - 1 = 0 \quad (5)$$

该方程可以通过最优化迭代求解快速得到衍射光的方向余弦(0, y', z')数值解, 再根据晶体内衍射光计算晶体外的衍射光方向。在获取动量失配的光线衍射方向后, 只要获取该失配光线的相对衍射效率即可得到空间维的线扩散函数。由于非理想声矢量的强度较弱, 所以该波长的衍射效率也会较低。为了计算失配光线的衍射效率需要先引入动量失配量 Δk , 动量失配量可表示为:

$$\Delta k = \sqrt{(y' - y_c')^2 + (z' - z_c')^2} \quad (6)$$

该失配量越大, 则代表与入声光产生声光作用的声矢量越远离理想声矢量方向。当失配量较小时, 即 (y', z') 离 (y_c', z_c') 较近时, 此时 Δk 方向近似为等声频率椭球泰勒级数展开的一阶项, 与声群速度方向相互垂直。在计算得到动量失配量后, 即可根据公式 (7) 计算动量失配下的相对衍射效率:

$$\eta = u^2 \frac{\sin^2 \left(\sqrt{u^2 + \left(\frac{\Delta k L}{2} \right)^2} \right)}{u^2 + \left(\frac{\Delta k L}{2} \right)^2} \quad (7)$$

式中: $u \sim \sqrt{\eta_0}$, η_0 为峰值衍射效率; L 为声光相互作用长度, 声光相互作用长度与换能器长度成正比。当衍射光的出射方向以及相对衍射效率确定后, 即可确定 AOTF 在某个固定频率下的光谱-空间维耦合响应。不同的入射波长对应不同的衍射方向以及衍射效率。晶体内的衍射光方向通过波矢量布局的约束条件进行计算, 而空气中的衍射光方向则会受到 AOTF 后楔角的影响, 如图 3 所示。

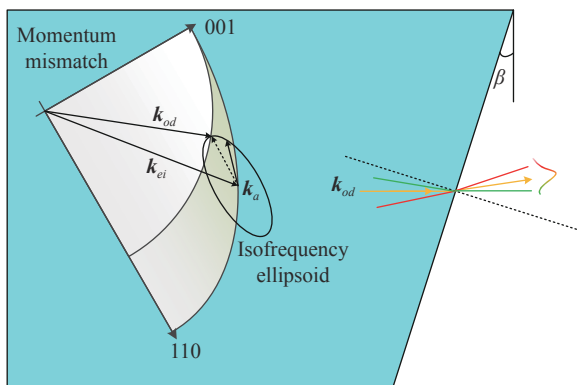


图 3 AOTF 声光作用以及后楔角的色散

Fig.3 Acousto-optic interaction of AOTF and dispersion of rear cut angle

2.2 验证实验

可见光 AOTF 一般采用的晶体为 TeO_2 , 这是一种双折射晶体, 双折射晶体本身存在色散, 该色散与声光作用带宽内的色散耦合, 导致 AOTF 衍射光在空气中的出射角同时受到声光作用和 AOTF 后楔角影响。根据公式 (5)、(7) 进行数值计算可以得到 AOTF 不同波长衍射光在空气中出射方向以及衍射效率, 从而获取 AOTF 的光谱-空间维响应。文中以 E 光进 O 光出的 AOTF 为例, 超声切角为 6.5° , 入射光与 001 轴夹角为 15° , 后楔角为 -4.8° , 80 MHz 以下声光互作用长度为 9 mm, 80 MHz 以上的声光互作用长度为 2.6 mm, 数值计算得到的光谱-空间维响应如图 4(a),(e) 红线所示。将光谱-空间维响应投影在光谱维即可得到 AOTF 的光谱响应函数, 如图 4(a),(e) 蓝线所示。同理, 将光谱-空间维响应投影在空间维即可得到 AOTF 的空间维响应函数, 如图 4(a),(e) 绿线所示。根据空间维响应函数可以计算得到 AOTF 器件的线扩散函数 (LSF), LSF 通过傅里叶变换后可取得 AOTF 器件的 MTF 曲线, 如图 4(b),(f) 蓝线所示。该 MTF 为 AOTF 器件由于声光作用产生的 MTF, 并不包含光学系统像差以及衍射极限的影响。

为了验证理论计算的 MTF, 通过斜刀口靶测试获取了 AOTF 器件的 MTF, 如图 4(b),(f) 红线所示, 测试得到的 MTF 与理论计算的 MTF 偏差小于 0.1, 通过 $(\text{MTF}_{\text{实测}} - \text{MTF}_{\text{理论}}) / \text{MTF}_{\text{理论}}$ 计算得到实测与理论值的相对偏差, 如图 4(c),(g) 所示, 截止频率内的相对偏差小于 15%。此处, 实测值与理论值的偏差会受到多方面因素影响, 例如刀口靶边缘锐利程度、探测器噪声、图像非均匀性均会影响 MTF 的实测值。

结果表明, 对于文中所采用的 AOTF 设计参数, 59.6 MHz 的 MTF 比 99.4 MHz 的 MTF 更优, 在光谱图像上则应该表现为 750 nm 波长的图像比 500 nm 的光谱图像更为清晰。而且, 无论是 59.6 MHz 还是 99.4 MHz 的 MTF 均存在截止频率。如果采用图像复原的方式, 只能够在截止频率的带宽内放大高频信号, 对于超出截止频率的信号, 则难以再通过数字图像处理的手段进行复原。

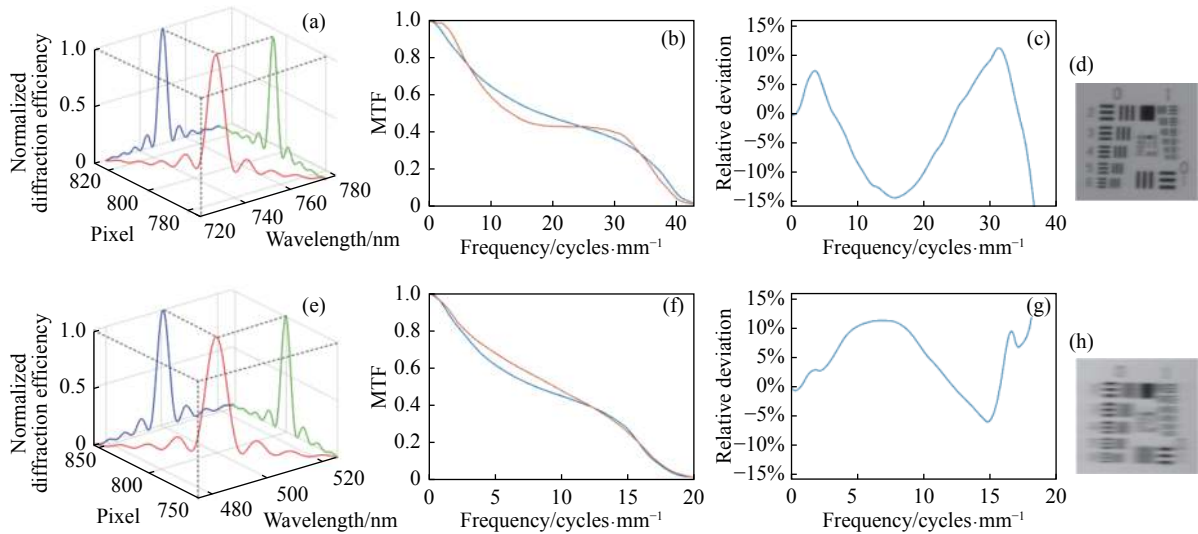


图 4 (a) 59.6 MHz (中心波长 750 nm) 的光谱-空间维响应 (红线)、光谱维响应 (蓝线)、空间维响应 (绿线); (b) MTF 曲线, 蓝线为 59.6 MHz 空间维响应的傅里叶变换, 红线为斜刀口靶实测 MTF; (c) MTF 实测值与理论值的相对偏差@59.6 MHz; (d) 59.6 MHz 的光谱图像; (e) 99.4 MHz (中心波长 500 nm) 的光谱-空间维响应 (红线)、光谱维响应 (蓝线)、空间维响应 (绿线); (f) MTF 曲线, 蓝线为 99.4 MHz 空间维响应的傅里叶变换, 红线为斜刀口靶实测 MTF; (g) MTF 实测值与理论值的相对偏差@99.4 MHz; (h) 99.4 MHz 的光谱图像

Fig.4 (a) Response of spectrum-space dimensional (red line), spectral response (blue line), spatial response (green line) at 59.6 MHz (central wavelength 750 nm); (b) MTF curve, blue line is Fourier transform of 59.6 MHz spatial response, red line is measured MTF by oblique knife edge target; (c) Deviation between the measured MTF and the theoretical MTF @59.6 MHz; (d) Spectral image of 59.6 MHz; (e) Response of spectrum-space dimensional (red line), spectral response (blue line), spatial response (green line) at 99.4 MHz (central wavelength 500 nm); (f) MTF curve, blue line is Fourier transform of 99.4 MHz spatial response, red line is measured MTF by oblique knife edge target; (g) Deviation between the measured MTF and the theoretical MTF @99.4 MHz; (h) Spectral image of 99.4 MHz

3 不同后楔角下的 AOTF 器件像质分析

由前述分析可知: AOTF 后楔角会影响衍射光在空气中的出射角度, 所以在可见光范围内可利用合理的后楔角产生色散对声光作用的带宽内色散进行补偿, 从而抑制光谱图像的退化, 但现有的 AOTF 后楔角普遍被设计为补偿 AOTF 的横向色差以减少不同波段光谱图像之间的漂移。为了评估不同后楔角下 AOTF 器件的像质, 文中以超声切角为 6.5° 的 AOTF 器件为例, 根据前述理论方法计算出不同后楔角下的 MTF。该 AOTF 波段范围 $400\sim 1000\text{ nm}$, 光谱带宽 $2\sim 10\text{ nm}$, 分为两个换能器通道, AOTF 切型与声光相互作用长度与前述示例一致。文中将不同后楔角的 AOTF 像质进行横向比较, 后楔角范围为 $-8^\circ\sim 8^\circ$, 其中 -4.8° 为针对该 AOTF 横向色差抑制所优化的最优角度。同时, 文中分别计算了两个驱动频率下 AOTF 的 MTF, 99.4 MHz 对应的声光相互作用长度为 2.6 mm , 59.6 MHz 对应的声光相互作用长度为 9 mm 。MTF 计

算与线扩散函数相关, 而线扩散函数的计算过程中会有系统等效焦距的影响, 文中以 50 mm 等效焦距为例。

由图 5 可知, 无论是短波还是长波, 随着后楔角增加, AOTF 的 MTF 随之增大, 但是从截止频率的变化范围来看, 改变后楔角对短波的影响更大。为了表征不同后楔角下 AOTF 像质优劣, 文中采用 MTF30 作为量化指标, 该指标取 MTF 等于 30% 处的空间频率作为评价像质的标准, 30% MTF 处的空间频率越高代表像质越好。文中计算不同波段、不同后楔角对应的 MTF30 如表 1 所示。

在实际应用中, 一般对成像系统的奈奎斯特频率处 MTF 更为关注, 例如当应用要求奈奎斯特频率处 MTF 优于 30% 时, 则可以通过查找表中的空间频率推导出满足应用需求的 AOTF 后楔角角度。同时, 通过分析发现在现有 AOTF -4.8° 后楔角下的 MTF30 比 0° 后楔角的更低。所以, 横向色差校正与更优的空间响应本身是一对矛盾, 无法同时满足。当横向色差

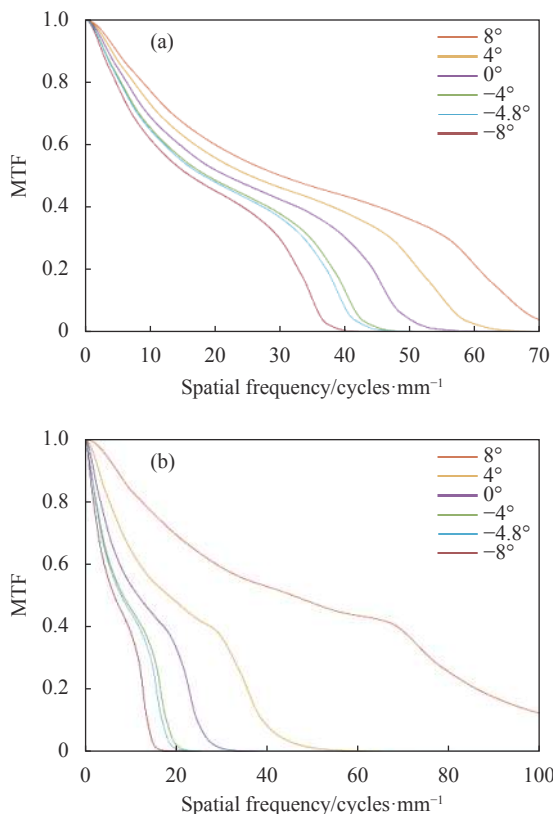


图 5 (a) 59.6 MHz (中心波长 750 nm) 不同后楔角的 MTF; (b) 99.4 MHz (中心波长 500 nm) 不同后楔角的 MTF

Fig.5 (a) MTF of 59.6 MHz (central wavelength 750 nm) with different rear cut angles; (b) MTF of 99.4 MHz (central wavelength 500 nm) with different rear cut angles

表 1 99.4 MHz (中心波长 500 nm) 和 59.6 MHz (中心波长 750 nm) 不同后楔角的 MTF30 空间频率
Tab.1 MTF30 with different rear cut angles at 99.4 MHz (center wavelength 500 nm) and 59.6 MHz (center wavelength 750 nm)

99.4 MHz		59.6 MHz	
Rear cut angle/(°)	Spatial frequency/cycles·mm ⁻¹ @MTF30	Rear cut angle/(°)	Spatial frequency/cycles·mm ⁻¹ @ MTF30
8	75.9	8	55.7
6	45.6	6	50.9
4	32.6	4	47.1
2	25.6	2	43.4
0	21.0	0	40.2
-2	17.7	-2	37.4
-4	15.3	-4	34.7
-4.8	14.5	-4.8	33.7
-6	11.7	-6	32.2
-8	7.2	-8	29.9

得到校正, 则 MTF 会下降。如果针对 MTF 来优化后楔角, 则横向色差会引起不同波长的光谱图像漂移。所以, 设计阶段的 MTF 定量计算十分重要, 可用以保证 AOTF 的后楔角设计能满足实际应用需求。

4 结 论

AOTF 光谱图像退化是 AOTF 成像光谱仪的固有现象。文中聚焦于 AOTF 器件的空间维响应, 率先提出了 AOTF 器件的空间响应定量计算方法。与现有的 AOTF 模型相比, 文中的模型同时考虑了声光作用导致的带宽内色散以及后楔角的色散, 根据 AOTF 器件的理论 MTF 判断 AOTF 光谱成像的像质是否改善。基于此方法, 以超声切角为 6.5° 的 AOTF 为例, 计算了该 AOTF 的理论 MTF, 理论结果与实际测试的 MTF 保持了一致, MTF 偏差小于 0.1, 相对偏差小于 15%。该方法对于 AOTF 器件的设计具有重要意义, 基于文中方法, 可在设计阶段就进行 AOTF 的像质评价, 减少 AOTF 器件切型优化的工程迭代成本。最后, 针对超声切角 6.5° 的 AOTF 分析了不同后楔角下的 MTF, 指出 MTF 与横向色差之间是一对矛盾的性能指标。如果针对 MTF 进行后楔角优化, 则无法校正横向色差, 但对于横向色差要求较低的应用, 可采用定标的方式进行横向色差校正, 然后针对光谱图像像质优化 AOTF 后楔角, 减少邻近像元的光谱混叠。文中针对 AOTF 提出 MTF 理论模型, 为 AOTF 器件的后楔角选择提供了重要参考, 也为获取高空间分辨率的光谱图像奠定了基础。

参考文献:

[1] Tang Shaofan, Lu Zhijun, Wang Weigang, et al. Brief description of space hyperspectral imager (invited) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(3): 0303003. (in Chinese)

[2] Zhang Rui, Xie Kunyang, Jing Ning, et al. Technology of hyperspectral full polarization imaging based on superachromatic 1/4 wave plate and acousto-optic tunable filter [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(8): 0814004. (in Chinese)

[3] Batshev V, Machikhin A, Martynov G. et al. Polarizer-free AOTF-based SWIR hyperspectral imaging for biomedical applications [J]. *Sensors*, 2020, 20(16): 4439.

[4] Korablev O, Ivanov A, Fedorova A, et al. Development of a

- mast or robotic arm-mounted infrared AOTF spectrometer for surface Moon and Mars probes[C]//Proceedings of SPIE, 2015, 9608: 960807.
- [5] Wu Changkun, Zhang Wei, Hao Yazhe. Design of a control system for a visible/near-infrared real-time imaging spectrometer [J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(2): 348-354. (in Chinese)
- [6] Chang I C. Noncollinear acousto-optic filter with large angular aperture [J]. *Applied Physics Letters*, 1974, 25(7): 370-372.
- [7] Yano T, Watanabe A. Acousto-optic TeO₂ tunable filter using far-off-axis anisotropic bragg diffraction [J]. *Applied Optics*, 1976, 15(9): 2250-2258.
- [8] Gass P A, Sambles J R. Accurate design of a noncollinear acousto-optic tunable filter [J]. *Optics Letters*, 1991, 16(6): 429-431.
- [9] Voloshinov V B, Molchanov V Y, Mosquera J C. Spectral and polarization analysis of optical images by means of acousto-optics [J]. *Optics & Laser Technology*, 1996, 28(2): 119-127.
- [10] Voloshinov V B, Mosquera J C. Wide-aperture acousto-optic interaction in birefringent crystals [J]. *Optics & Spectroscopy*, 2006, 101(4): 635-641.
- [11] Krauz L, Páta P, Bednář J, et al. Quasi-collinear IR AOTF based on mercurous halide single crystals for spatio-spectral hyperspectral imaging [J]. *Optics Express*, 2021, 29(9): 12813-12832.
- [12] Gorevoy A V, Machikhin A S, Martynov G N, et al. Spatio-spectral transformation of noncollimated light beams diffracted by ultrasound in birefringent crystals [J]. *Photonics Research*, 2021, 9(5): 687-693.
- [13] Mantsevich S N, Kostyleva E I. Examination of the temperature influence on phase matching frequency in tunable acousto-optic filters [J]. *Ultrasonics*, 2018, 91: 45-51.
- [14] Chang Lingying, Song Jingjing, Jin Mengzhu. Study on spectral transfer function based on dual AOTF acousto-optic crystal [J]. *Journal of Applied Optics*, 2019, 40(2): 202-209. (in Chinese)
- [15] Suhre D R, Gupta N. Acousto-optic tunable filter sidelobe analysis and reduction using telecentric confocal optics [J]. *Applied Optics*, 2005, 44(27): 5797-5801.
- [16] Wachman E S, Niu W, Farkas D L. Imaging acousto-optic tunable filter with 0.35-micrometer spatial resolution [J]. *Applied Optics*, 1996, 35(25): 5220-5226.
- [17] Denes L J, Gottlieb M S, Kaminsky B. Acousto-optic tunable filters in imaging applications [J]. *Optical Engineering*, 1998, 37(4): 1262-1267.
- [18] Zhang C, Wang H, Qiu Y. Sidelobe reduction of Acousto-optic tunable filter by double-filtering[C]//Proceedings of SPIE, 2010, 7656: 76566F.
- [19] Anikin S P, Esipov V F, Molchanov V Y, et al. An acousto-optical imaging spectrometer for astrophysical measurements [J]. *Optics & Spectroscopy*, 2016, 121(1): 115-122.
- [20] Machikhin A S, Pozhar V E. Image transformation caused by wide-angle acousto-optic interaction [J]. *Quantum Electronics*, 2010, 40(9): 837-841.
- [21] Voloshinov V B, Yushkov K B, Linde B. Improvement in performance of a TeO₂ acousto-optic imaging spectrometer [J]. *Journal of Optics A Pure and Applied Optics*, 2007, 9(4): 341-347.
- [22] Yu Kuanxin, Ding Xiaohong, Pang Zhaoguagn. Acousto-optic Principle and Acousto-optic Devices[M]. Beijing: Science Press, 2011. (in Chinese)