

高分辨率傅里叶变换光谱仪分束器补偿器的厚度匹配设计

陈芳, 高超, 白杰

北京空间机电研究所, 北京 100086

摘要 应用于航天遥感领域的高光谱分辨率傅里叶变换光谱仪, 多采用分束器补偿器的方案实现分光。由于光学器件的加工误差, 实际应用的分束器与补偿器厚度并不能达到理想的完全匹配, 当分束器与补偿器的厚度不匹配时, 由于厚度误差引入的光程差会在视场内产生干涉条纹, 进而影响光谱仪的调制度并降低其信噪比。为满足航天遥感高信噪比的要求, 需要根据性能要求对分束器与补偿器的厚度误差范围进行限制, 即分束器补偿器厚度匹配设计。通过理论分析方法建立了引入厚度匹配误差的附加光程差计算公式, 以及视场范围内的光谱仪干涉信号强度计算公式, 并通过 Zemax 建模仿真直观显示了由于分束器与补偿器厚度匹配误差导致的视场内干涉条纹信号, 给出了光谱仪调制度随厚度匹配误差增加而下降的变化曲线。分析了视场范围在厚度不匹配条件下对调制度影响的增强效果, 发现扩展光源的入射角变动受视场角影响, 入射角变动越大导致光程差变化量越大, 进而引起调制度的下降越大; 分析了光源波数与计量激光波数不同条件下, 由于器件折射率变化导致的色散效应对厚度不匹配影响的增强效果, 发现厚度不匹配误差越大色散相位差越大, 要恢复明确相位需要限制厚度不匹配误差使其引起的色散相位差小于 2π 。通过理论分析, 建立了分束器补偿器厚度匹配设计准则, 提出先通过光谱仪光谱范围和计量激光器参数限制分束器补偿器厚度不匹配误差, 再导入光谱仪设计参数计算厚度不匹配误差与调制度关系曲线, 根据调制度要求进一步限制厚度不匹配误差。通过该设计准则, 可以提出傅里叶变换光谱仪的分束器补偿器厚度不匹配公差范围, 指导分束器与补偿器的工程设计。

关键词 厚度匹配; 分束器; 补偿器; 傅里叶变换光谱仪

中图分类号: O436 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2020)12-3941-05

引言

高光谱干涉技术以亚纳米级的光谱分辨率获取探测对象丰富的光谱信息, 已被广泛用于遥感领域。干涉光谱技术是利用干涉图与光源光谱图之间的对应关系, 通过获取目标的干涉图并对其进行傅里叶变换, 反演得到光谱图, 从而获取光谱信息。相对于传统的色散型光谱仪, 从原理上解决了能量利用率低的缺陷, 且具有多通道和高光谱分辨率的优点, 是目前国际高光谱技术领域的研究热点之一, 尤其是在红外遥感探测领域^[1-3]。

日本的 GOSAT 和加拿大的 ACE 是目前在轨运行的用于大气遥感探测的傅里叶变换红外光谱仪^[1-3], 与我国目前在研的高光谱分辨率傅里叶近红外光谱仪一样, 都是迈克尔逊干涉仪型的傅里叶变换红外光谱仪。该类傅里叶变换光谱仪采用迈克尔逊干涉仪原理, 利用反射镜的移动产生光程

差, 并得到不同光程差下的干涉信号^[4-5]。为了提升光谱仪的分辨率和性能, 前人的研究主要集中于移动反射镜运动误差引入的光程误差的影响, 包括移动反射镜速度误差影响^[6], 以及安装误差影响^[7], 并提出通过将移动平面镜替换为角镜或楔形镜来消除运动与机械误差^[5, 8-10]。

角镜式迈克尔逊干涉仪型傅里叶变换光谱仪结构如图 1 所示, 两个角镜均安装在由同一转轴驱动的相互正交的摆臂上, 通过摆臂摆动得到不同光程差下的干涉信号^[10]。在设计过程中, 发现除了运动镜片的动态误差可以引入附加光程差外, 分束器与补偿器的厚度匹配误差等静态误差也会影响光谱仪的精度和性能, 对于应用于航天遥感领域的高信噪比要求的傅里叶变换光谱仪, 其影响不可忽略。本文对分束器与补偿器的厚度匹配误差对光谱仪的影响进行了详细的分析和计算, 推导出分束器补偿器的厚度匹配误差的计算方法, 进一步提升了光谱仪的精度与性能。

收稿日期: 2019-07-30, 修订日期: 2019-10-09

基金项目: 国家科技重大专项资助

作者简介: 陈芳, 女, 1985年生, 北京空间机电研究所高级工程师

e-mail: happystraw@126.com

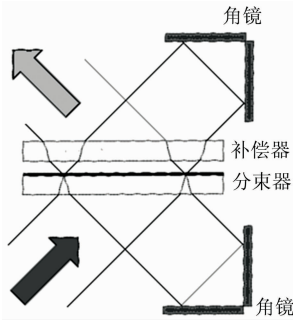


图 1 角镜式迈克尔逊干涉仪光学结构图

Fig. 1 The optical structure of corner-cubemirror Michelson interferometer

1 理论分析

传统的迈克尔逊干涉仪光学结构如图 1 所示, 补偿器是为了减小分束器的色散对干涉效果的影响而加入的, 因此要求补偿器与分束器在材料性能和厚度上完全一致。材料性能可以从同炉的基底材料上进行控制, 基本可以消除这一影响, 而厚度因为加工精度影响, 总是存在一定差异, 这使得从分束面分开后的两束光所走过的光程不完全相同, 导致干涉调制度的降低。

1.1 扩展光源的干涉信号

在理想情况下, 分束器、补偿器厚度一致, 点光源的干涉信号^[11-12]为

$$I(x) = \int_0^{\infty} 2RTB(\gamma) \cos(2\pi\gamma x) d\gamma \quad (1)$$

式(1)中, $2RTB(\gamma)$ 为光源的光谱函数, γ 为波数, x 为中心光程差。

在实际应用中, 为了获得一定的辐射强度, 光谱仪的目标光源都是扩展光源, 具有一定的视场角, 关于中心视场圆对称的扩展光源, 视场张角的半角为 θ , 干涉信号^[13-14]为

$$I(x, \Omega) = \int_0^{\infty} 2RTB(\gamma) \int_0^{\Omega} \cos(2\pi\gamma x \cos\theta) d\Omega d\gamma \quad (2)$$

其中立体角 $\Omega = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\theta} \sin(\theta') d\theta' = 2\pi(1 - \cos\theta)$ 。

干涉信号的性能可以用调制度描述, 调制度 M 定义为

$$M = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$$

其中 I_{\max} 和 I_{\min} 分别是干涉信号 $I(x, \Omega)$ 在不同中心光程差下的极大值和极小值, 对于理想的傅里叶光谱仪, 调制度 $M = 1$ 。

1.2 分束器与补偿器厚度不匹配引入的光程差分析

如图 2 所示, 分束器和补偿器的几何厚度分别为 d_1 和 d_2 , 空气间隙为 d_3 , 光线入射到分束器上的入射角为 α , 相应的折射角为 β , 分束器和补偿器的基底材料的折射率关于波数 γ 的函数为 $n(\gamma)$ 。则光路 1 与光路 2 在分束器和补偿器中走过的附加光程差为

$$\Delta x = x_1 - x_2 = \frac{n(\gamma)}{\cos\beta} [(3d_1 + d_2) -$$

$$(d_1 + 3d_2)] \left[1 - \frac{\cos(\alpha - \beta)}{n(\gamma)} \right] = \frac{2n(\gamma)}{\cos\beta} (d_1 - d_2) \left[1 - \frac{\cos(\alpha - \beta)}{n(\gamma)} \right] = \frac{2n(\gamma)}{\cos\beta} \Delta d \left[1 - \frac{\cos(\alpha - \beta)}{n(\gamma)} \right]$$

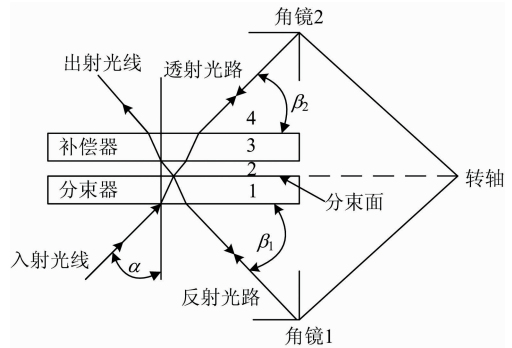


图 2 迈克尔逊干涉仪结构示意图

Fig. 2 The structure of Michelson interferometer

分束器与补偿器的厚度差为 $\Delta d = (d_1 - d_2)$, 根据折射定律, 有 $\sin\beta = \sin\alpha/n(\gamma)$, 则分束器与补偿器厚度不匹配引起的几何光程差为

$$\Delta x = \frac{2n^2(\gamma)\Delta d}{\sqrt{n^2(\gamma) - \sin^2\alpha}} \left[1 - \frac{\cos\alpha \sqrt{n^2(\gamma) - \sin^2\alpha} - \sin^2\alpha}{n^2(\gamma)} \right] \quad (3)$$

增加分束器与补偿器厚度不匹配所带来的光程差后, 干涉信号为

$$I(x, \Omega) = \int_0^{\infty} 2RTB(\gamma) \int_0^{\Omega} \cos[2\pi\gamma(x \cos\theta + \Delta x)] d\Omega d\gamma \quad (4)$$

采用波数为 γ_0 的单色光源进行分析, 则

$$I(x, \Omega) = \int_0^{\Omega} \cos \left[2\pi\gamma_0 \left\{ x \cos\theta + \frac{2n^2(\gamma_0)\Delta d}{\sqrt{n^2(\gamma_0) - \sin^2\alpha}} \cdot \left[1 - \frac{\cos\alpha \sqrt{n^2(\gamma_0) - \sin^2\alpha} - \sin^2\alpha}{n^2(\gamma_0)} \right] \right\} \right] d\Omega \quad (5)$$

2 厚度不匹配影响分析

分束器与补偿器厚度不匹配的厚度差 Δd 会引入新的几何光程差 Δx , 其会影响光谱仪的调制度(即光谱仪的性能), 由理论分析可知, 入射角 α 、折射率 $n(\gamma)$ 会影响厚度差 Δd 对光程差 Δx 的影响程度, 因此分析厚度差 Δd 、入射角 α 和折射率 $n(\gamma)$ 对光谱仪的性能影响是进行傅里叶光谱仪设计的基础。

2.1 厚度不匹配对光谱仪调制度的影响分析

对于实际应用中的傅里叶光谱仪, 目标均为扩展光源, 根据式(3), 在不同视场处, 分束器与补偿器的厚度不匹配 Δd 引起的几何光程差不同, 根据式(5), 对扩展光源全视场范围内的信号进行积分运算, 得到扩展光源的干涉信号。当分束器与补偿器厚度一致, 即 $\Delta d = 0$, 全视场范围的干涉信号关于中心视场圆对称, 且当摆臂摆动引起的几何光程差 x

$=0$ 时, 全视场范围的干涉信号同时达到峰值。当分束器与补偿器厚度不一致, Δd 不为零, 全视场范围的干涉信号不再关于中心视场圆对称, 由于相同立体角处的入射角不同, 因此分束器与补偿器厚度差引起的几何光程差 Δx 与摆臂摆动引起的几何光程差 $x \cos\theta$ 关于立体角 Ω 的变化趋势不一致, 当摆臂摆动引起的几何光程差 $x=0$ 时, 全视场范围的干涉信号不再同时达到峰值, 而是由于 Δx 的不同而出现条纹, 从而使得光谱仪的调制度下降。

对分束器与补偿器的厚度差对光谱仪调制度的影响进行分析, 设目标光源波数为 $\gamma=12\ 500\ \text{cm}^{-1}$, 视场角为 $\theta=\pm 5\ \text{mrad}$, 摆臂摆动最大光程差为 $L=1.1\ \text{cm}$ 。根据式(5)计算厚度差 Δd 对干涉信号的影响。图 3 为不同厚度差 Δd 下, 摆臂摆动引起的几何光程差 $x=0$ 时全视场内的干涉图(利用 zemax 模拟仿真得到)。

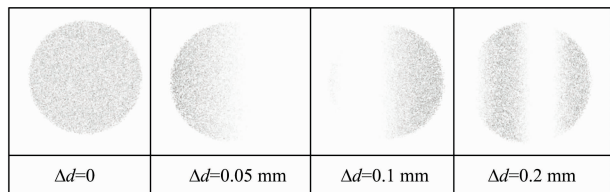


图 3 不同厚度差 Δd 下, $x=0$ 时全视场内的干涉图(zemax 模拟)

Fig. 3 The interferogram of the whole field when OPD is zero (Zemax calculation)

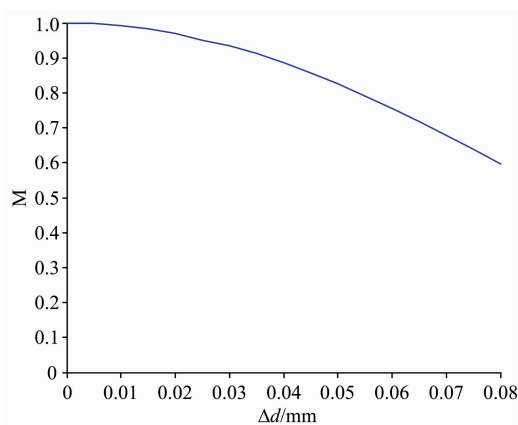


图 4 光谱仪调制度随厚度差 Δd 的变化曲线

Fig. 4 Curve between thickness matching and modulation

根据以上分析, 分束器与补偿器的厚度差引入额外的几何光程差使得总光程差不再关于中心视场圆对称, 在理想最大值 1 时和最小值 0 时均出现干涉变化条纹, 从而降低了调制度, 而对光谱分辨率没有影响。根据 Zemax 分析得到的视场内干涉图可以得到不同厚度差 Δd 下的光谱仪调制度曲线, 如图 4 所示。由图 4 可知, 调制度的下降量是关于厚度差的递增函数, 在设计过程中, 需根据信噪比对调制度的要求来确定分束器与补偿器的厚度差的值。

2.2 视场角范围对厚度不匹配影响的增强效果

理想情况下, 光源为点光源(视场半角 $\theta=0$), 分束器与

补偿器厚度不匹配所带来的光程差是一个定值, 只影响光谱仪零光程差位置, 而不会影响干涉信号的调制度。对于实际应用中的傅里叶光谱仪, 不存在点光源, 目标均为扩展光源, 对于不同视场大小的扩展光源, 分束器与补偿器厚度不匹配所带来的影响是不相同的。

对于迈克尔逊干涉仪, 扩展光源视场为 $\pm\theta$, 中心视场在分束器上的入射角为 45° , 则全视场内的入射角 α 的变化范围为 $(45-\theta)\sim(45+\theta)$, 入射角 α 的范围由视场半角 θ 确定。对于非成像傅里叶光谱仪, θ 一般为小量, 不超过 1° , 在此量级范围内, 光程差 Δx 是入射角 α 的递增函数, 在视场范围内, 光程差的变化值 $\delta=\Delta x_{\max}-\Delta x_{\min}$ 越大, 表示视场范围内的条纹越多, 则对干涉信号的调制度影响越大。

图 5 为波数 $\gamma=12\ 500\ \text{cm}^{-1}$ 、不同厚度差 Δd 下光程差的变化值 δ 随视场半角 θ 的变化曲线。视场半角 θ 越大, 在允许调制度下降量相同的前提下, 要求厚度差 Δd 越小, 则分束器与补偿器的厚度加工精度要求越严格。因此在傅里叶光谱仪设计时需综合考虑各个参数的设计。

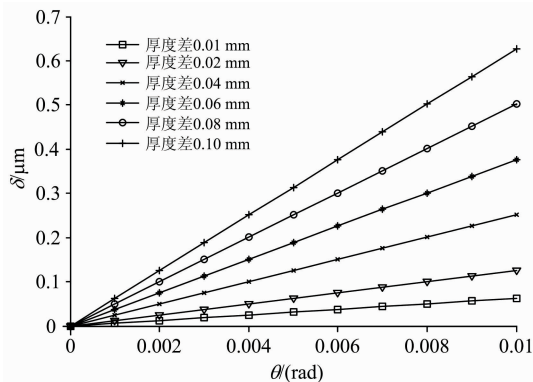


图 5 不同厚度差 Δd 下光程差的变化值 δ 随视场半角 θ 的变化曲线($\gamma=12\ 500\ \text{cm}^{-1}$)

Fig. 5 Curve between field and OPD

2.3 色散对厚度不匹配影响的增强效果

对于某一材料来说, 折射率 $n(\gamma)$ 随波数 γ 变化。由于光谱仪采用激光光路作为采样的基准, 计量激光光路与光谱仪共光路, 如果分束器与补偿器的厚度不一致, 存在厚度差, 目标光源的波数 γ 与计量激光的波数 γ_0 在分束器补偿器中的折射率的差异将引入色散, 造成二者的干涉图有一个相位差

$$\delta(\gamma) = 4\pi\gamma\Delta d \left[\frac{n(\gamma)}{\cos\beta} - \frac{\cos(\alpha-\beta)}{\cos\beta} - \frac{n(\gamma_0)}{\cos\beta_0} + \frac{\cos(\alpha-\beta_0)}{\cos\beta_0} \right] \quad (6)$$

若要使相位恢复明确, 应当保持相位差小于 $2\pi^{[13]}$ 。

分束器和补偿器材料是石英玻璃, 其折射率色散近似公式为

$$n(\lambda) = \sqrt{1 + \frac{0.683\ 74\lambda^2}{\lambda^2 - 0.004\ 603\ 5} + \frac{0.420\ 32\lambda^2}{\lambda^2 - 0.013\ 397} + \frac{0.585\ 03\lambda^2}{\lambda^2 - 64.493\ 27}}$$

波长 λ 单位为 μm 。图 6 为目标光源波数为 $12\ 500\ \text{cm}^{-1}$ 、计量激光波数为 $7\ 633\ \text{cm}^{-1}$ 时的色散相位差与厚度差之间的变化曲线, 由图可知, 为了满足相位条件($<2\pi$), 分

束器与补偿器的厚度匹配误差应小于 0.053 5 mm。

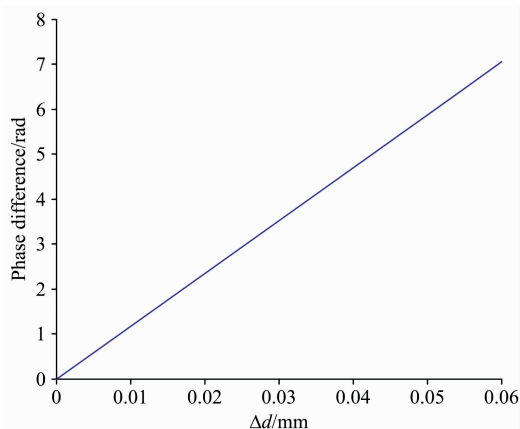


图 6 色散相位差与厚度差之间的变化曲线

Fig. 6 Curve between thickness matching and phase difference

3 傅里叶光谱仪的厚度匹配设计准则

对一个用于地球温室气体检测的高光谱分辨率傅里叶变换光谱仪进行设计, 光谱仪采用双角镜摆臂的迈克尔逊干涉仪原理, 分光采用分光器补偿器方案, 工作波长和光谱分辨率如表 1 所示, 计量激光波长为 $1.31 \mu\text{m}$ 。根据信噪比指标分配要求分束器与补偿器厚度匹配公差所造成的调制度下降量小于 5%, 按照式(5)设计适用于此光谱仪的分束器与补偿器的厚度匹配公差。

表 1 高光谱分辨率傅里叶变换光谱仪参数
Table 1 Design parameters of high spectral resolution Fourier interferometer

	光谱范围/ cm^{-1}	光谱分辨率/ cm^{-1}	视场角/mrad
Band1	12 900~13 200	0.6	± 5
Band2	5 810~6 400	0.27	± 5
Band3	4 800~5 200	0.27	± 5
Band4	4 200~4 500	0.27	± 5

根据第 3 节的分析总结出分束器补偿器厚度匹配设计准则:

(1) 根据相位匹配要求计算厚度匹配误差的最大值

根据 2.3 节色散影响分析, 首先确定各谱段满足相位匹配要求的分束器与补偿器厚度匹配误差的最大值, 如表 2 所示, 可见, 为满足与计量激光相位匹配的要求, 分束器与补偿器厚度匹配误差应小于 0.045 mm。

(2) 根据调制度要求精确计算厚度匹配误差

根据式(5)计算分束器与补偿器厚度匹配误差小于

表 2 各谱段分束器与补偿器厚度匹配误差的最大值

Table 2 The allowed maximum value of thickness matching

	光谱范围/ cm^{-1}	$\Delta d/\text{mm}$
Band1	12 900~13 200	0.045
Band2	5 810~6 400	0.151
Band3	4 800~5 200	0.089
Band4	4 200~4 500	0.068

0.045 mm 时各谱段的调制度的变化曲线, 如图 7 所示。可知, 波数越大, 调制度对分束器与补偿器厚度匹配误差越敏感, 即波长越短, 分束器与补偿器厚度匹配误差对调制度的影响越大。根据分束器与补偿器厚度匹配公差所造成的调制度下降量小于 5% 的要求, 分束器与补偿器厚度匹配误差应小于 0.025 mm。

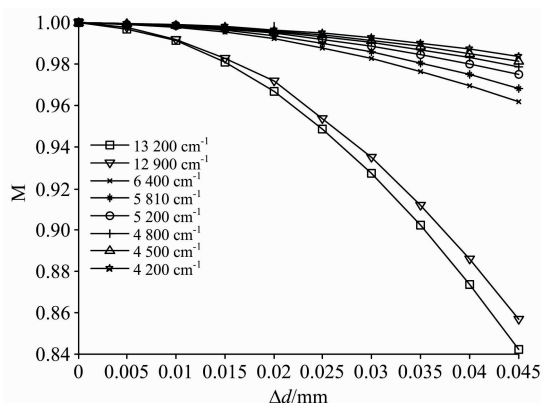


图 7 各谱段的调制度随分束器与补偿器厚度匹配误差的变化曲线

Fig. 7 Curve between thickness matching and modulation in optical range

4 结论

对采用分束器补偿器分光方案的傅里叶变换光谱仪的设计过程中, 分束器补偿器厚度匹配误差对光谱仪调制度的影响进行了详细的理论分析和模型计算, 分析了涉及的多个参数: 厚度差 Δd 、入射角 α 和折射率 $n(\gamma)$ 对调制度的影响程度, 总结了分束器补偿器厚度匹配误差设计准则: (1) 根据工作谱段和计量激光波长的指标计算相位匹配所允许的最大厚度匹配误差; (2) 在最大误差范围内确定符合信噪比对调制度的要求的厚度匹配误差值。以一航天领域的高光谱分辨率傅里叶变换光谱仪为设计实例, 得到了满足指标要求的分束器补偿器厚度匹配误差。此种方法适用于采用分束器补偿器分光方案的傅里叶变换光谱仪。

References

- [1] Golovin Y M, Zavelevich F S, et al. Atmospheric and Oceanic Physics, 2014, 50(9): 1004.
- [2] Akihiko Kuze, et al. Applied Optics, 2009, 48: 6716.
- [3] Ivan Valtchanov, Rosalind Hopwood, et al. Experimental Astronomy, 2014, 37: 207.

- [4] Zheng Ying, Liang Jingqiu, Liang Zhongzhu. *Optics Express*, 2013, 21: 884.
- [5] Tarek A Al-Saeed. *Optics Communications*, 2018, 425: 1.
- [6] Palchetti L, Lastrucci D. *Appl. Opt.*, 2001, 40(19): 3235.
- [7] Grzegorz Szymanski, Leszek Wawrzyniuk. *Optical Engineering*, 2015, 54: 074101.
- [8] Yang Q, Zhao B, Zeng X. *Chin. Optics Lett.*, 2013, 11(2): 021202.
- [9] Kazumasa Takadaa, et al. *Optics Communications*, 2013, 296: 61.
- [10] Yang Qinghua. *Appl. Opt.*, 2010, 49: 4088.
- [11] Brault J W. *Fourier Transform Spectrometry*. Tucson: National Solar Observatory, 1984.
- [12] Born M, Wolf E. *Principles of Optics*. 6th Edition, Pergamon, 1980.
- [13] Hearn D R. *Fourier Transform Interferometry*. Lexington: Lincoln Laboratory, 1999.
- [14] Peng Y, Xue Y, Gao R. *Optik*, 2015, 126: 1002.

Thickness Matching Design Between Splitter and Compensator for High Spectral Resolution Fourier Transform Spectrometer

CHEN Fang, GAO Chao, BAI Jie

Beijing Institution of Space Mechanics and Electricity, Beijing 100086, China

Abstract The high spectral resolution Fourier transform spectrometer used in the aerospace field mostly adopt the scheme with a beam splitter and compensator for light splitting. However, for the machining error, the thickness between splitter and compensator cannot match perfectly, and the matching error would impact the interferometer modulation value which is an important parameter of the instrument SNR (Signal Noise Ratio). For the requirement of high SNR, the matching error (ME) between splitter and compensator must be limited, which means thickness matching design. Firstly, the impact caused by the thickness matching under different situation was analyzed with theoretical analysis, and then the formulas of additional optical path difference (OPD) and signal intensity are given. Secondly, the interference signal caused by ME is visually displayed with Zemax simulation and it can be obviously observed that the modulation value decreases with the increase ME. Furtherly, the view field of the extended light source will cause oscillation in the incidence angle of non-central light of field, which can increase the variance range of OPD and enhance the influence on modulation with ME. Beyond that, for the wave number difference between the light source and metering laser, the dispersion effect will be introduced into the spectrometer system and the ME will enhance the influence on the signal with dispersion effect. For phase retrieval requirement, the ME must be limited to ensure that the dispersion phase difference is no more than 2π . Finally, based on the theoretical analysis, the design principle of the thickness matching between splitter and compensator was summarized, and it provided a design method for the tolerance analysis of the interferometer, which will improve the performance of the Fourier transform spectrometer.

Keywords Thickness matching; Splitter; Compensator; Fourier transform spectrometer

(Received Jul. 30, 2019; accepted Oct. 9, 2019)