

doi:10.3788/gzxb20134203.0315

新型傅里叶变换光谱仪反射镜倾斜容限分析及实验

刘波, 朱永, 陈建君, 韦玮, 张洁, 王宁

(重庆大学 光电工程学院, 重庆 400044)

摘要:采用微机电系统微镜阵列和倾斜反射镜替代传统傅里叶变换光谱仪的动镜系统,提出一种基于微机电系统微镜阵列的新型傅里叶变换光谱仪.介绍了该光谱仪的工作原理,分析了倾斜反射镜倾斜角度的容限范围,并搭建了实验系统,进行了实验验证.理论推导表明:在近红外区域,反射镜倾角理论最大值为 0.52° ,光谱分辨率达到 8 nm;在可见光区域,反射镜倾角理论最大值 0.183° ,光谱分辨率达到 3 nm.选取可见光源 488 nm 激光器进行的实验验证结果表明:在倾角容限范围之内,光谱能准确还原;反之,光谱严重失真.最终,采用复色光源进一步实验验证了理论分析的正确性.

关键词:光谱;微机电系统;傅里叶变换

中图分类号:TH744.1

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2013)03-0315-5

Analysis of Tolerance of Tilting Mirror and Experiment in Novel Fourier Transform Spectrometer

LIU Bo, ZHU Yong, CHEN Jian-jun, WEI Wei, ZHANG Jie, WANG Ning
(College of Optoelectronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Equipped with a tilt mirror and micro-mirror replacing the moving mirror, a novel Fourier transform spectrometer is proposed based on programmable Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS) micro-mirror. Firstly, the working principle and the tolerance of the tilting mirror is analyzed systematically and validated experimentally. Theory results show that the limited tilt angle is 0.52° and the spectrum resolution is 8 nm in the near infrared region; while the limited tilt angle is 0.183° , the spectrum resolution is 3 nm in the visible region. Experimental measurement shows that the spectra can be reconstructed accurately in the tolerance of the tilting mirror with central wavelength 488 nm laser source and polychromatic light source, while distorted badly out of the tolerance range.

Key words: Spectrum; Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS); Fourier transform

0 引言

光谱检测技术以快速无损的优点广泛应用于食品安全、石油化工、遥感环境测量等众多领域^[1].随着现代科学技术的迅猛发展,环境和安全监测、医疗分析检测、空间探测、气象、军事分析和食品安全检测以及反恐防化等领域对光谱仪器提出了高准确度、微型化、便携、快速、廉价以及在线检测等要求,促使微型光谱仪研究成为近年来科学研究的热点.傅里叶变换光谱仪因具有光通量大、分辨率高和

通道传输^[2]的优势而受到研究人员的青睐.然而,传统的傅里叶变换光谱仪通常体积庞大、结构复杂、成本高、防潮抗震性能差,对工作环境要求苛刻^[2-4].近年来,微纳米加工技术发展迅速,微机电系统 (Micro-Electro-Mechanical Systems, MEMS) 器件、二元光学和集成光学领域微细加工技术的成熟使傅里叶变换光谱仪微型化、低成本成为可能.见诸报道的主要有长春光机所提出的新型空间调制微型傅里叶变换光谱仪^[1,4-5];瑞士纳沙泰尔大学研制的微型傅里叶变换光谱仪^[2];美国德克萨斯大学研制的

基金项目:国家自然科学基金(No. 60976084)资助

第一作者:刘波(1987-),男,硕士研究生,主要研究方向为光谱学、光电仪器. Email:20100802001@cqu.edu.cn

导师(通讯作者):朱永(1973-),男,教授,主要研究方向为光纤传感、智能仪器. Email:yongzhu@cqu.edu.cn

收稿日期:2012-09-07;录用日期:2012-11-05

集成化的微型光谱仪等^[3].但是,上述微小型傅里叶变换光谱仪普遍生产成本高,系统部分元件加工难度大,目前仍主要停留在实验室研究阶段.

本文提出了 MEMS 微镜阵列^[4]和倾斜反射镜相结合替代传统傅里叶变换光谱仪的动镜系统,并结合单点光电探测器实现基于傅里叶变换光谱仪原理的光谱探测,分析了倾斜反射镜的倾角容限并进行了实验验证.该光谱仪无运动部件、防潮防震、体积小、结构简单,克服了传统傅里叶变换光谱仪的缺点^[5-10].

1 系统原理

可编程 MEMS 微镜阵列是一种光机电一体化元件,其光学部分表面是由镀有极高反射率的铝材料做成的微小镜片阵列,适合于做光学反射镜;在数字驱动电路控制下,可编程 MEMS 微镜各列可独立在 $\pm 12^\circ$ 两个方向上偏转.本文提出的傅里叶变换光谱系统由光源系统、改进的迈克尔逊干涉具、可编程 MEMS 微镜阵列、信号探测及实时处理系统组成,如图 1 所示.光源出射光经过准直系统转换成平行光进入改进的迈克尔逊干涉具中,在平面反射镜和倾斜反射镜处反射,回到分束器 (beam splitter, BS) 处发生干涉,干涉光透过样品以后,经 MEMS 微镜阵列逐列翻转选择不同光程差的干涉光,由汇聚透镜系统汇聚到单点探测器中,探测器输出携带样品信息的干涉光强信号;信号采集系统采集并记录干涉图,对得到的光强数据进行傅里叶逆变换,得到携带有样品信息的光谱曲线.

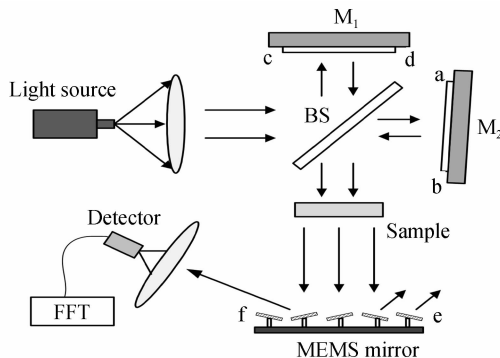


图 1 系统框图

Fig. 1 Schematic diagram of novel Fourier spectrometer

设倾斜镜 M_2 倾斜 θ 角, M_2 的 a 端与平面反射镜 M_1 的 d 端到分束器 BS 的距离相等,理想情况下为零光程差.设可编程 MEMS 微镜阵列 e 端列为起始列,共 m 列, MEMS 微镜单列宽为 τ ,可得到第 x 列对应光束与起始列对应光束的光程差为

$$\delta = 2x\tau \cdot \tan \theta \quad (1)$$

对光源各波数单色干涉光强积分,得到光源全

光谱范围在第 x 列时的干涉光强.

$$I(x) = \int_{\nu_1}^{\nu_2} B_0(\nu) \exp(i2\pi\nu x \tau \tan \theta) d\nu \quad (2)$$

对采集到的离散干涉光强数据进行傅里叶逆变换,得到携带了样品信息的光谱分布图函数.

$$B_0 = \sum_{-\frac{m}{2}}^{\frac{m}{2}} I(x) \exp(-i2\pi\nu x \tau \tan \theta) \quad (3)$$

B_0 为波数为 ν 的光波的光谱强度,根据式 (3) 依次计算光源谱带内各波数的光谱强度分布,进而得到经过样品以后的携带了样品信息的光谱图,把测试得到的光谱图与标准光谱对比,实现样品检测.

1.1 倾斜镜的容限分析

在该光谱仪系统中,反射镜 M_2 的倾斜角 θ 是实现光程差连续变化的关键,且傅里叶变换光谱仪的分辨率反比于系统能实现的最大光程差.本系统中,由于 MEMS 微镜阵列总宽度 L 为定值,系统可探测的光场范围唯一确定.因此,该系统下最大光程差表示为 $\Delta = 2L \tan \theta$,光程差的大小仅随倾斜反射镜的倾角大小变化而变化.然而,在传统傅里叶变换光谱仪中,反射镜倾斜会引入调制误差和相位误差,倾斜角 θ 过大会使复原光谱产生严重变形而影响光谱仪性能.因此,倾斜反射镜的倾角容限成为决定基于 MEMS 微镜的傅里叶变换光谱系统性能的关键因素.

如图 2 所示,当 MEMS 微镜逐列翻转时,倾斜镜 M_2 被分割成与 MEMS 微镜单列宽度一致的微单元.随着 MEMS 微镜逐列翻转,近似认为 M_2 的微单元在水平方向匀速运动,带来光程差的连续变化.

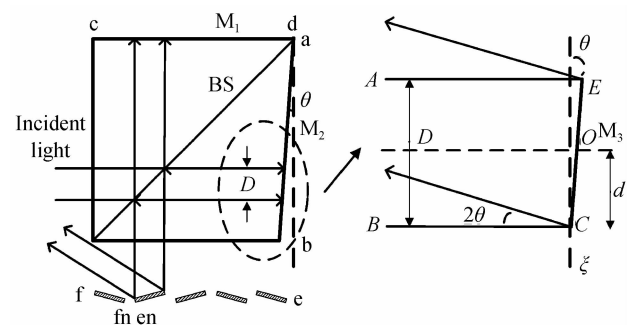


图 2 等效光路图

Fig. 2 The optical path of the novel FTS

根据经典傅里叶变换光谱仪误差分析理论,从调制误差和相位误差角度讨论倾斜镜的角度容限^{5,10-15}.

微镜逐列翻转选择干涉光进入单点探测器,相当于将倾斜镜 M_2 等间距分割成 m 个微型反射镜 M_3 来实现能量分割^[1].如图 2, M_3 以 C 端为倾斜中心, O 为入射光束中心, D 是入射光矩形口径,口径

$D = \tau$, 光束中心到倾斜中心的相对距离恒定为 $d = D/2$; MEMS 微镜第 x 列翻转, 对应的倾斜中心处的光程差为

$$x_0 = 2x\tau \tan \theta \quad (4)$$

光线 BC 和 AE 间的光程差

$$\Delta x = 2D \tan \theta \quad (5)$$

以倾斜中心处光程差 x_0 为变量, 干涉强度变为^[6]

$$I(x_0) = \frac{1}{D} [B(\nu) \{1 + \cos [2\pi\nu(x_0 + 2\xi\theta)]\}] \cdot d\xi \quad \xi \in (0, D) \quad (6)$$

ξ 是入射光线中任一光束离倾斜中心的距离。

当倾斜角为 θ 时, 干涉图中引入了 sinc 函数调制, 调制度变为 $M(D, \theta) = \text{sinc}(2\pi\nu D\theta)$. 式中引入了恒定的初相位 $\varphi(d, \theta) = 2\pi\nu D\theta$, 即带来固定的相位误差. 恒定误差可以在还原过程进行修正, 所以本文主要考虑调制度的误差, 为了减小误差, 选取调制度下降为无倾斜时的 95% 时作为误差极限^[11], 倾斜镜能够倾斜的最大角度为 θ_{\max} .

$$M(D, \theta) = \text{sinc}(2\pi\nu D\theta) \geq 95\% \quad (7)$$

式(7)傅里叶级数展开为

$$\text{sinc}(2\pi\nu D\theta) = 1 - \frac{(2\pi\nu D\theta)^2}{6} \geq 95\% \quad \theta \leq \lambda/11.4D \quad (8)$$

在近红外区域 ($0.8 \sim 2.5 \mu\text{m}$), 取中心波长 $\lambda = 1.4 \mu\text{m}$, 当调制度大于 95% 时, 最大允许倾角 $\theta_{\max} = 0.009 \text{ rad}$, 约 0.52° ; 最大光程差为 $254.27 \mu\text{m}$, 波长分辨率 8 nm , 能够满足近红外光谱探测一般要求. 在可见光区域 ($400 \sim 780 \text{ nm}$), 取中心波长 $\lambda = 500 \text{ nm}$, 其允许的最大倾角为 $\theta_{\max} = 0.0032 \text{ rad}$, 约 0.183° ; 最大光程差为 $89.87 \mu\text{m}$, 波长分辨率为 3 nm .

2 实验验证

为验证倾斜镜倾斜容限对光谱还原的影响, 搭建了如图 3 所示的实验系统, 设计了 MEMS 微镜驱动电路、准直系统及信号采集系统, 实验中干涉具^[16]由立方体分束器和平面反射镜制作而成。

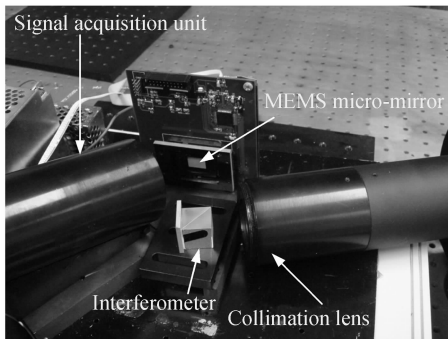


图 3 实验系统

Fig. 3 Top view of the experiment setup

实验中利用波长为 488 nm 激光器 (线宽小于 1 MHz) 作为光源, 分别在倾角 0.15° 和 0.5° 下进行了实验, 通过去噪, 切趾, 相位校正等^[17] 处理得到还原光谱如图 4 所示。

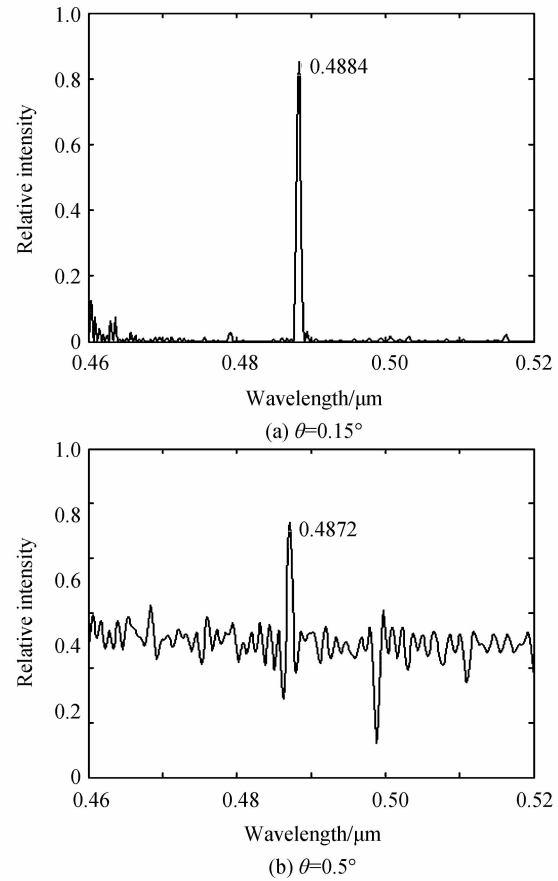


图 4 θ 取 0.15° 和 0.5° 时中心波长 488 nm 还原得到的光谱曲线

Fig. 4 The spectra with central wavelength 488 nm obtained from experimental system when $\theta = 0.15$ and $\theta = 0.5^\circ$, respectively

实验结果表明, 当倾斜角为 0.15° 时, 对中心波长 488 nm 的激光, 还原波长为 488.4 nm , 光谱分辨率为 2.5 nm , 信噪比达到 23 dB . 当倾角超出理论容限取倾角为 0.5° 时, 还原波长为 487.2 nm , 这与倾角增大引起最大光程差增大, 从而影响傅里叶变换相关, 其分辨率能达到 2 nm , 但是信噪比明显下降, 约为 4 dB , 过大的倾斜角带来误差, 造成还原光谱出现负值. 对比可见, 在倾角容限范围之内, 光谱分辨率略有降低, 但还原光谱信噪比提高显著, 光谱准确, 旁瓣抑制好; 而当倾角处于容限之外时, 还原光谱信噪比很低, 几乎不能分辨, 且出现不应出现的负值, 还原光谱失真严重。

为了进一步验证结论的准确性, 实验还采用了复色光源 (特征谱线 1305 nm 和 1392 nm) 在倾斜镜容限范围内 (取 $\theta = 0.15^\circ$) 进行实验, 得到还原光谱如图 5 (a) 所示. 对比图 5 (b) 利用 ANDO

ELECTRIC 公司的 AQ6317B 型光谱仪测得的标准谱线可知:该系统所得两条特征谱线无混叠,能够清晰分辨,证明该系统的可行性.由于在相同倾角情况下,近红外波段对应的分辨率偏低和采样时存在零点误差,会存在一定的谱线偏移和光谱展宽,有待进一步改进实验系统并改进光谱还原算法,进而改善实验结果.

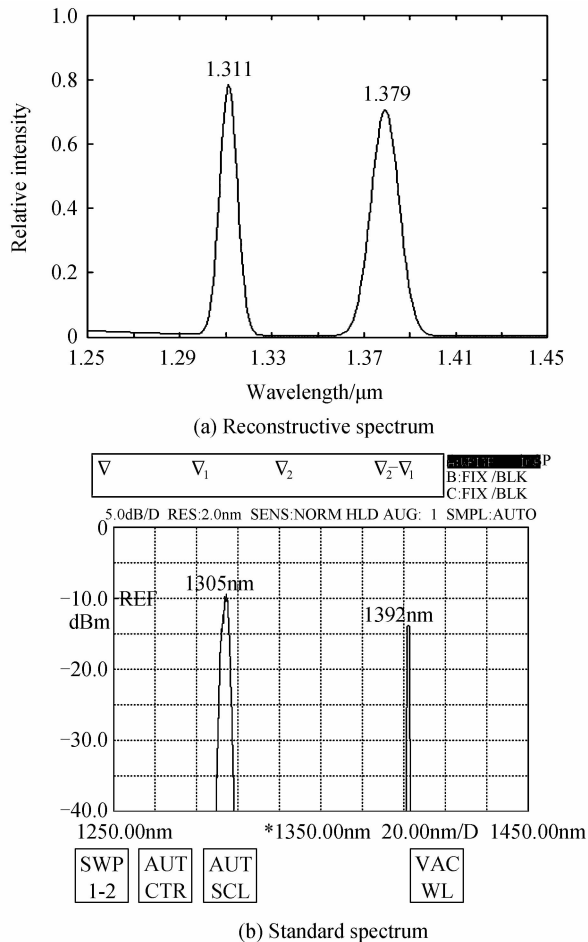


图5 复色光源的光谱还原曲线和标准光谱

Fig. 5 The spectra of the polychromatic source and the standard spectrum obtained with experimental system and AQ6317B spectrometer

3 结论

本文提出了一种基于可编程 MEMS 微镜阵列的新型傅里叶变换光谱仪系统.对倾斜反射镜的倾斜角的容限进行了分析,进行了相关的实验,验证了理论分析的正确性.进一步的研究将着力于改进实验系统,开展中红外特征波段光谱探测研究,实现在中红外一定带宽波段范围内的特殊物质检测,并进行基于该系统的便携、廉价、微型化和高可靠性的在线物质检测仪器的研究.

参考文献

[1] KONG Yan-mei, LIANG Jing-qiu, WANG Bo, *et al.* The investigation and simulation of a novel spatially modulated

micro-fourier transform spectrometer[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, **29**(4): 1142-1146.

孔延梅,梁静秋,王波,等. 新型空间调制微型傅里叶变换光谱仪的设计与仿真[J]. *谱学与光谱分析*, 2009, **29**(4): 1142-1146.

[2] MANZARDO O, HERZIG H P, MARXER C R, *et al.* Miniature time-scanning Fourier transform spectrometer based on silicon technology[J]. *Optics Letters*, 1999, **24**(23): 1705-1707.

[3] SIN J, LEE W H, POPA D, *et al.* Assembled Fourier transform micro-spectrometer[J]. *Micromachining and Micro Fabrication Process Technology Xi*, 2006, **6109**(04): 1-8.

[4] DUDLEY D, DUNCAN W, SLAUGHTER J. Emerging digital micromirror device (DMD) applications[C]. *SPIE*, 2003, **4985**: 14-25.

[5] KRAFT M, KENDA A, FRANK A, *et al.* Single detector micro-electro-mechanical scanning grating spectrometer [J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2006, **386** (5): 1259-1266.

[6] WEI Wei, HUANG Shang-lian, CHEN Wei-min, *et al.* A novel near-infrared spectra detection system based on MEMS grating light modulators [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, **30**(3): 846-850.

韦玮,黄尚廉,陈伟民,等. 一种基于 MEMS 光栅光调制器的近红外光谱探测系统[J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, **30**(3): 846-850.

[7] MO Xiang-xia, WEN Zhi-yu, ZHANG Zhi-hai, *et al.* Design and experimental of digital micro-mirror spectrometer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(9): 1356-1360.

莫祥霞,温志渝,张智海,等. 数字微镜近红外光谱仪光学系统设计与实验[J]. *光子学报*, 2011, **40**(9): 1356-1360.

[8] CONG Feng, BO Wang, Zhangzhu Liang, *et al.* Miniaturization of step mirrors in a static Fourier transform spectrometer: theory and simulation[J]. *Journal of Optics Society*, 2011, **28**(1): 128-133.

[9] LACAN A, BREON F M, ROSAK A, *et al.* A static Fourier spectrometer for atmospheric sounding: concept and experimental implementation[J]. *Optics Express*, 2010, **18** (8): 8311-8331.

[10] FU Jian-guo, LIANG Jing-qiu, LIANG Zhong-zhu. Analysis and design for the optical system of a static infrared Fourier transform spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32** (2): 266-273.

一种静态傅里叶变换红外光谱仪的光学系统分析与设计[J]. *光学学报*, 2012, **32**(2): 266-273.

[11] XIANG-LI Bin, YANG Jian-feng, GAO Zhan, *et al.* On the tolerance of the mirror tilting in Fourier transform interferometer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 1997, **26** (2): 132-135.

相里斌,杨建峰,高瞻,等. 干涉光谱仪动镜倾斜误差容限分析[J]. *光子学报*, 1997, **26**(2): 132-135.

[12] XIANG-LI Bin. On the key design issues in Fourier Transform spectrometers[J]. *Acta Photonica Sinica*, 1997, **26**(6): 550-554.

相里斌. 傅里叶变换光谱仪中的主要技术环节[J]. *光子学报*, 1997, **26**(6): 550-554.

[13] ZENG Li-Bo, YIN Bang-sheng, HE Bing, *et al.* Error analysis of moving mirror in Fourier transform interferometer [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, **14**(2): 191-196.

曾立波,尹邦胜,何冰,等. 傅里叶变换红外光谱仪动镜倾斜误差分析[J]. *光学精密工程*, 2006, **14**(2): 191-196.

[14] YANG Qing-hua, ZHOU Ren-kui, ZHAO Bao-chang. Tilt

- tolerance of the moving mirror in Michelson interferometric spectrometer [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(3): 677-680.
- 杨庆华,周仁魁,赵葆常. 迈克尔逊干涉光谱仪倾斜镜倾斜误差容限分析[J]. *光子学报*, 2009, **38**(3): 677-680.
- [15] YIN Bang-sheng, ZENG Li-bo, LEI Jun-feng, *et al.* Error analysis of the mirror tilting in spectrum transform interferometer and the study on dynamic alignment technology[J]. *Optical Instruments*, 2006, **28**(1): 74-80.
- 尹邦胜,曾立波,雷俊锋,等. 光谱仪动镜倾斜误差分析及其动态校正研究[J]. *光学仪器*, 2006, **28**(1): 74-80.
- [16] LIU Zhi-chao, ZHANG Ji-long, WANG Zhi-bin, *et al.* Static Fourier transform spectrometer used in wide field of view detection[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(11): 2839-2843.
- 刘智超,张记龙,王志斌,等. 静态傅里叶变换干涉具在大视场探测中的应用[J]. *光子学报*, 2009, **38**(11): 2839-2843.
- [17] XIANG-LI Bin, YUAN Yan. Some aspects of the data processing of the single sided interferogram [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(12): 1869-1874.
- 相里斌,袁艳. 单边干涉图的数据处理方法研究[J]. *光子学报*, 2006, **35**(12): 1869-1874.

• 下期预告 •

傅里叶望远镜部分周期信号解调及对成像的影响

董磊, 刘欣悦, 刘杰, 于树海

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

摘要:为了解决傅里叶望远镜高功率短脉宽激光只能包含部分周期信号的难题,本文提出多脉冲拼接技术并对其基本原理和应用范围进行深入研究.首先介绍高功率短脉宽激光与声光移频器移频带宽之间的矛盾,进而引出利用傅里叶望远镜传统时间解调公式进行部分周期信号解调存在的困难.然后给出多脉冲拼接技术的基本理论,推导出理想情况下移频频率、脉冲重复率和脉宽满足的拼接条件.进而详细分析移频频率稳定性和脉冲重复率稳定性对多脉冲拼接成像结果的影响,并通过计算机仿真研究一般情况下脉宽变化对多脉冲拼接成像结果的影响.最后得出移频频率和脉冲重复率对成像无影响,激光脉宽变化小于25%仍可识别目标轮廓的结论.

关键词:傅里叶望远镜;多脉冲拼接;时间解调;部分周期;脉冲激光