

采用 MOPA 结构的光学外差干涉激光器

董磊,刘欣悦,张景旭,于树海,王国聪

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033)

摘要: 为了满足激光干涉成像,尤其是傅里叶望远镜成像对差频稳定的高功率光学外差干涉模式的需要,提出基于主振功放(MOPA)结构的光学外差干涉激光器的概念,并通过实验验证可行性。从原理上指出现有产生光学外差干涉模式方法的局限性,同时给出基于 MOPA 结构的光学外差干涉激光器的主要优点。指出基于 MOPA 结构的激光器可能存在明显影响相干性和产生光频漂移等的限制并设计实验验证。结果表明:功率放大过程对相干性没有明显影响,经过单级功放仍能保持线宽小于 0.1GHz(根据实测相干长度计算线宽约 30MHz),功放过程和倍频过程对光频漂移无影响,实测频漂小于 10Hz,与声光移频器的频率稳定性相吻合,故推知频漂完全由移频器引起。

关键词: 光学外差干涉; 主振功放; 傅里叶望远镜; 相干性; 频率漂移

中图分类号: TH743 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)02-0345-05

Optical heterodyne interference laser based on MOPA structure

Dong Lei, Liu Xinyue, Zhang Jingxu, Yu Shuhai, Wang Guocong

(Changchun Institute of Optics, Fine machines and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun 130033, China)

Abstract: In order to satisfy the requirement of laser interference imaging, especially Fourier telescope imaging, to generate frequency-stably high-power optical heterodyne interference mode, the concept of optical heterodyne interference laser based on the structure of MOPA was put forward and was proved by experiment. The limits of conventional method of generating optical heterodyne interference mode were pointed out and the main merits of optical heterodyne interference laser based on the structure of MOPA were presented. The possible limits of obvious effects on interference and inducing optical excursion were pointed out and were proved by experiment. The conclusion is given that the process of power amplification has no effect on interference and the line width is less than 0.1GHz by single amplification (based on real measurement of coherent length, the line width is about 30 MHz), and also that the processes of power amplification and frequency doubling has no effects on optical excursion and it is deduced that the real measurement of frequency excursion less than 10 Hz coinciding with frequency stability of AO frequency shifter was only related with frequency shifter.

Key words: optical heterodyne interference; master oscillator power amplifier; Fourier telescope; coherence; frequency excursion

收稿日期:2013-06-10; 修订日期:2013-07-25

基金项目:国家 863 计划(2012AAXXX1003X)

作者简介:董磊(1982-),男,助理研究员,硕士,主要从事傅里叶光学和激光技术应用方面的工作。Email:nodepression@126.com

0 引言

激光干涉成像具有主动照明提高成像信噪比和不需要获得光强的空间分布而只需测量随时间变化回波能量就可重构图像图像等优点,成为非常规成像领域的重要组成部分。其中的一种新型成像技术——傅里叶望远镜成像,具有主动成像、合成孔径、克服低阶大气湍流影响和低光学质量能量接收的特点,从而成为近几年的研究热点^[1-6]。

傅里叶望远镜成像关键技术之一是产生光学外差干涉模式。已有产生该干涉模式的方法^[7-9]都是将单频激光器生成的激光先分束再移频最终形成干涉条纹。该方法在实验室仿真环境内(低功率成像)是可行的,却不适用于实际系统。主要原因在于实际系统需要高功率激光成像,可能会损伤分光器件和移频晶体;功率提高光束直径也相应增大,将明显降低声光移频效率;单一激光器很难做到既有高功率输出又有很好的相干性。

出于上述考虑,笔者提出基于 MOPA 结构的光学外差干涉激光器的研究设想并通过实验验证其可行性。如果证实该想法可行将能产生差频稳定的高功率外差干涉模式。

1 原理

傅里叶望远镜的发射光学系统利用 3 束经过微量移频的相干光束在目标表面形成干涉条纹,通过干涉条纹的扫描获得目标的空间频谱,从而重构出目标图像^[9-11]。已报道产生 3 束移频相干光束的装置示意图^[6],如图 1 所示。该结构不适合应用高功率激光器的场合,原因如下。首先,保偏分光膜一般含有金属膜,抗激光损伤阈值不高,声光晶体的损伤阈值

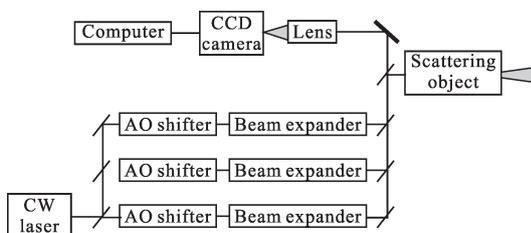


图 1 产生 3 束移频相干光束装置示意图

Fig.1 Scheme of equipment generating 3 frequency-shifted coherent beams

也不是很高,所以实际系统的高功率激光可能损坏保偏分光器件和声光移频晶体。其次,高功率激光的光束直径一般较大($>10\text{ mm}$),而声光移频晶体的有效通光口径较小(1 mm 左右),所以不能有效地对高功率激光进行移频操作。

考虑到已有装置的上述缺点,提出一种产生光学外差干涉的新型装置——基于 MOPA 结构的连续运转光学外差干涉激光器,并对其特性进行实验验证。光学外差干涉激光器的示意图如图 2 所示。

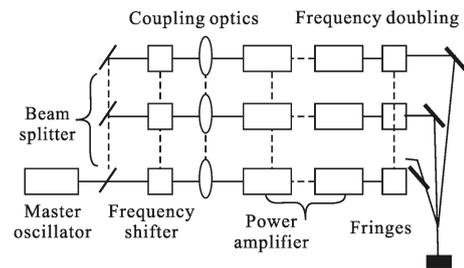


图 2 光学外差干涉激光器示意图

Fig.2 Scheme of optical heterodyne interference laser

主振功放结构激光器(MOPA)可以在保持主振荡光输出光束特性基础上利用多级激光功率放大器将激光功率或脉冲能量不断放大,最终可以产生较好光束质量和高功率激光输出。所以可以设想利用该结构生成高功率长相干激光输出。由于现有的 MOPA 激光器多用于仅考虑高功率应用的场合,忽视相干性的要求,所以为了能够兼顾高功率和相干性,需要通过实验验证经过功放后激光相干性衰减程度,同时为了形成稳定的外差干涉模式,还需要验证功率放大器 and 后续倍频过程是否对光频有明显影响。

2 实验验证

实验验证的目标主要分两方面:目标 1 为研究功放激光器是否会明显影响激光相干性,即是否使线宽明显加宽;目标 2 为研究功放过程和倍频过程是否会引入随机光频漂移,从而影响外差干涉模式的差频稳定性。

根据目标 1 可以设计实验 1 如下:种子光源(主振荡激光器)输出激光经过保偏分光器件分成两束,先分别经过声光移频器移频相同频率,然后入射单级功放激光器,经过功率放大后的激光再入射倍频晶体。利用波长计测量其中一束的线宽,计算对应相干

长度,然后将两束光分别引入米级光程差,观察当光程差增加到何种程度后,形成的干涉模式仍能满足傅里叶望远镜成像要求。

根据目标 2 可以设计实验 2 如下:在实验 1 中的两路声光移频器中引入不同移频值,去掉实验 1 引入的米级光程差,将扩束后的两束光入射同一目标表面,目标后放置光电倍增管接收目标透射光能量。该能量随时间的变化频率等于两束光的差频值。利用模/数转换和频率解调可以获得经过倍频后两束光的差频值。比较该差频值与移频器移频差值,即可验证激光功率放大器和倍频晶体是否会引入随机光频漂移。

实验 1 的实验装置主要包括以下器件:种子光源、保偏分光镜、声光移频器、激光功率放大器、倍频晶体。其中种子光源和激光功率放大器为长春新产业公司研制;保偏分光镜对 1 064 nm 激光实现 5/5 分光;声光移频器为中电集团 26 所研制,移频带宽 20 MHz,频率稳定性优于 10 Hz/2 h;倍频晶体为 KTP 晶体;扩束望远镜为 Thorlabs 的 20 倍扩束望远镜。

实验 2 在实验 1 的基础上增添的器件有:英国 ET 生产的光电倍增管,型号为 P30A-05。

实验 1 的实验装置图如图 3 所示,倍频后光束线宽的测量结果如图 4 所示,在两束光中引入光程

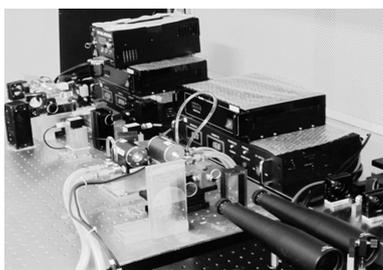


图3 实验装置图

Fig.3 Figure of experimental equipments

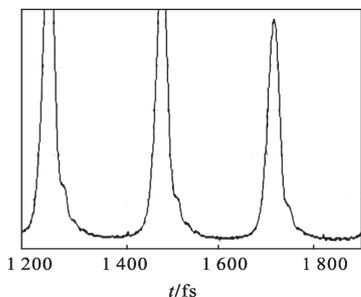


图4 线宽测量结果

Fig.4 Measurement of line width

差后干涉图如图 5 所示。

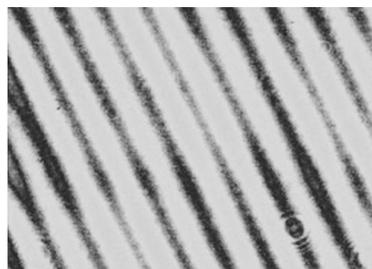


图5 干涉条纹图

Fig.5 Figure of interference fringes

线宽与相干时间满足关系式 $\Delta\nu \cdot \Delta t \approx 1$, 相干长度与相干时间满足关系式 $L_c = c \cdot \Delta t$, 其中 c 代表光速。将实验 1 的线宽测量结果代入上述两式,可以得到经过功率放大之后的激光相干长度约为 3 m。由于波长计的线宽测量精度为 0.1 GHz, 所以实际激光的线宽有可能远小于 0.1 GHz, 即相干长度远大于 3 m。为了确定实际激光相干长度的数值,在两光路中引入光程差,通过观测随着光程差的增加,干涉条纹对比度的变化情况,估计激光的相干长度。激光相干长度约为选定条纹对比度对应的光程差。当条纹对比度为图 5 干涉图所示情况时,光程差约为 10 m,即激光相干长度约为 10 m,根据上面线宽与相干长度的关系式,可以计算出这时对应的线宽约为 30 MHz。可以看出:经过功率放大和倍频之后的激光仍然具有较高的相干性。

实验 2 在实验 1 的基础上增加了目标和光电倍增管,如图 6 所示。目标为利用硫酸纸打印的透射式漫射体,尺寸约为 2 mm。目标紧靠光电倍增管,在紧靠目标前放置 532 nm 干涉滤光片消除杂光干扰。目标透射能量经过模/数转换和解调后的频谱分布如图 7 和图 8 所示。

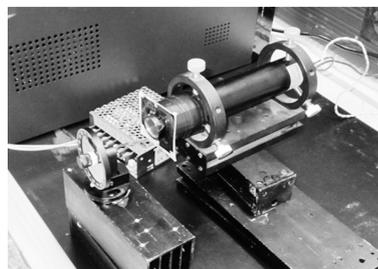


图6 目标和光电倍增管

Fig.6 Object and PMT

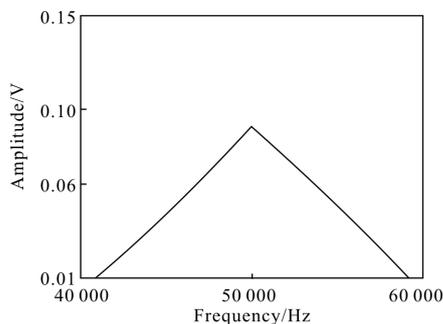


图 7 1 064 nm 激光差频 25 kHz 的频谱分布

Fig.7 Spectrum of heterodyne 25 kHz of 1 064 nm laser

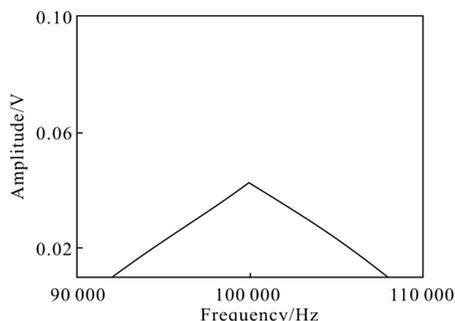


图 8 1 064 nm 激光差频 50 kHz 的频谱分布

Fig.8 Spectrum of heterodyne 50 kHz of 1 064 nm laser

在验证激光功率放大器和倍频晶体对激光光频漂移影响的实验中,选取两组不同的 1 064 nm 激光差频,分别为 25 kHz 和 50 kHz。因为倍频晶体可以将入射光的光频加倍,所以对于两束有差频的入射光,倍频后光束的差频将是之前的 2 倍。如果激光功率放大器和倍频晶体均不引起光频漂移或漂移很低,则经功率放大和倍频后光束差频应该精确为 1 064 nm 激光差频的两倍。由图 7 和图 8 可以看出,差频分别为 25 kHz 和 50 kHz 的 1 064 nm 激光经过功率放大和倍频后的差频分别为 50 kHz 和 100 kHz(即频谱分布极大值对应的横坐标值,单位 Hz),误差限小于 10 Hz。该误差限与声光移频器的移频稳定性一致,可以推断该误差限完全由声光移频器引起。至此证实功放过程和倍频过程不引入光频漂移,采用在 MOPA 结构中植入声光移频器的方式,可以产生差频稳定的外差干涉模式。

3 结论

文中提出一种产生高功率光学外差干涉模式的方法,即利用 MOPA 结构产生高功率单频激光,利用在种子光源后增加分光器件和移频器件的方

法实现光学外差干涉。从原理上给出基于 MOPA 结构的光学外差干涉激光器所具有的主要优点,即在保持较高相干性基础上输出高功率激光和光学外差干涉条纹具有较高的差频稳定性。通过实验验证得出功率放大不会明显降低激光相干性以及功放过程和倍频过程不会产生光频漂移的结论。该结论证实了产生稳定差频的高功率外差干涉模式的可行性。

参考文献:

- [1] Zhang Yan, Yang Chunping, Guo Jing, et al. Spectrum extraction mode for Fourier telescope in laboratory[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23 (3): 571-576. (in Chinese)
张炎, 杨春平, 郭晶, 等. 实验室中傅里叶望远镜频谱抽取方式[J]. *强激光与粒子束*, 2011, 23(3): 571-576.
- [2] Chen Wei, Li Quan, Wang Yangui. Experimental research of Fourier telescope imaging system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(2): 0311001-1-6. (in Chinese)
陈卫, 黎全, 王雁桂. 傅里叶望远镜成像系统的实验研究[J]. *光学学报*, 2011, 31(2): 0311001-1-6.
- [3] Liu Xinyue, Dong Lei, Wang Jianli. Fourier telescope imaging via sparse sampling [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(3): 521-527. (in Chinese)
刘欣悦, 董磊, 王建立. 稀疏采样傅里叶望远镜成像[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(3): 521-527.
- [4] Yu Qianyang, Qu Hongsong. Realization of high resolution visible earth observation on geostationary earth orbit [J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2008, 1(1): 1-12. (in Chinese)
于前洋, 曲宏松. 实现同步轨道(GEO)高分辨力对地观测的技术途径(上) [J]. *中国光学与应用光学*, 2008, 1(1): 1-12.
- [5] Chen Baogang, Dong Lei, Lin Xudong. Segmented mirror of Fourier telescope field experimental system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, 40(1): 87-91. (in Chinese)
陈宝刚, 董磊, 林旭东. 傅里叶望远镜外场实验系统拼接主镜[J]. *光子学报*, 2011, 40(1): 87-91.
- [6] Dong Lei, Liu Xinyue, Chen Baogang, et al. Field experiment and result analysis of fourier telescope [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, 40(9): 1317-1321. (in Chinese)
董磊, 刘欣悦, 陈宝刚, 等. 傅里叶望远镜外场实验与结果分析[J]. *光子学报*, 2011, 40(9): 1317-1321.

- [7] Cuellar E L, Stapp J, Coper J. Laboratory and field experimental demonstration of a Fourier telescope imaging system[C]//SPIE, 2005, 5896: 58960D1-15.
- [8] Dong Lei, Liu Xinyue, Wang Jianli. The realization of Fourier telescope technology in laboratory [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16(6): 999-1002. (in Chinese)
董磊,刘欣悦,王建立. 实验室环境内傅里叶望远镜技术的实现[J]. 光学精密工程, 2008, 16(6): 999-1002.
- [9] Mikhail Belen'kii, Kevin Hughes, Tim Brinkley, et al. Residual turbulent scintillation effect and impact of turbulence on the Fourier telescope system [C]//Proceedings of International Society for Optics and Photonics, 2004, 5160: 56-67.
- [10] Wang Minghao, Dong Lei. Comparison of Fourier telescope imaging principle[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(6): 1646-1652. (in Chinese)
王鸣浩,董磊. 傅里叶望远镜成像原理对比验证[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(6): 1646-1652.
- [11] Ye Su, Liu Yi, Wu Jian. Effects of antenna array configurations on imaging quality in Fourier telescope [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(3): 611-616. (in Chinese)
叶溯,刘艺,吴健. 傅里叶望远镜中天线阵列配置对成像质量的影响[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(3): 611-616.