

一种主动修正投影光栅提高在线三维测量精度的方法

武迎春 曹益平 肖焱山

(四川大学光电科学技术系, 四川 成都 610064)

摘要 提出一种发散照明中主动修正投影光栅周期的方法。基于 Stoilov 算法的相位测量轮廓术(PMP)在线三维(3D)测量技术采用发散照明时,参考平面光栅像周期发生变化,会变成不等周期分布,从而降低在线测量精度。针对这一问题提出了一种主动修正投影光栅周期的方法,利用静态 PMP 分析参考平面截断相位分布,采用迭代算法逐步修正投影光栅的周期,使投影到参考面的光栅像具有良好的等周期性分布;同时避免对系统参数进行测量和计算的繁杂工作。实验验证了该方法的正确性,能有效提高在线 3D 测量的适应度和测量精度。

关键词 测量;相位测量轮廓术;Stoilov 算法;发散照明;修正;迭代算法

中图分类号 TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0908009

A New Method of Actively Modifying the Grating to Improve the Accuracy of On-Line Three-Dimensional Inspection

Wu Yingchun Cao Yiping Xiao Yanshan

(Department of Optoelectronics, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China)

Abstract A new method of actively modifying the periods of projected grating in divergent lighting system is proposed. In the on-line three-dimensional (3D) inspection with phase measuring profilometry (PMP) based on Stoilov algorithm, the divergent lighting system results in the non-constant period of the fringe pattern on the reference plane, which will lower the measurement accuracy. Therefore, a novel method about modifying the periods of the projected grating is proposed, which improves the flexibility and accuracy of the on-line 3D inspection and avoids the complicated calculation and measurement of the system parameter. Through analyzing the wrapped phase distribution of reference plane with static PMP, modifying the periods of the projected grating gradually by iterative algorithm, the constant period of fringe pattern on the reference plane is achieved. Experiment proves the feasibility of this method.

Key words measurement; phase measuring profilometry; Stoilov algorithm; divergent lighting; modification; iterative algorithm

OCIS codes 100.2650; 100.5088; 120.2830; 120.6650

1 引 言

光学三维(3D)面形测量方法^[1~3]由于具有非接触、高速、高精度、易于在计算机控制下实行自动化测量等优点,已得到大量深入研究并被广泛应用。

在几种主动 3D 传感技术中,基于 Stoilov 算法的相位测量轮廓术(PMP)^[4~8]只要求相移步长相等,无需确定步距值和 2π 整数倍的相移总量,在在线 3D 测量中具有广阔的应用前景。它通过投影 1 frame

收稿日期:2011-04-01; 收到修改稿日期:2011-06-07

基金项目:国家 863 计划(2007AA01Z333)、国家重大专项(2009ZX02204-008)及四川省学术和技术带头人培养基金(07GRC-01)资助课题。

作者简介:武迎春(1984—),女,博士研究生,主要从事光学三维传感和光信息处理等方面的研究。

E-mail:ycwu.scu@qq.com

导师简介:曹益平(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事光学三维传感、光信息处理和光机电一体化等方面的研究。

E-mail:caoying@mail.sc.cninfo.net(中国光学学会会员号:6100106,通信联系人)

正弦条纹图像到待测物体(载物台或传送带)表面,在参考平面法线方向采用 CCD 拍摄物体表面变形条纹图像,当被测物体随传送带匀速运动时在相等时间间隔内依次拍摄5 frame物体处于不同位置的变形条纹图,通过一系列处理获得在线物体的3D信息,实现在线3D测量。由于采用发散照明方式,导致参考平面上的正弦光栅图像变成不等周期分布,在物体匀速运动、CCD拍摄频率固定的条件下,会造成物体移动相同位移而所拍摄的条纹图像间的相移量变成不相等,这样大大降低了在线3D测量精度。

针对以上问题本文提出了一种利用静态PMP分析参考平面截断相位分布,采用迭代算法逐步修正投影光栅周期的方法,使投影到参考面的光栅像具有良好等周期性,从而保证了相移量的相等性,提高在线3D测量的适应度和精度。

2 基于 Stoilov 算法的 PMP 原理

基于 Stoilov 算法的 PMP 在线3D测量技术原理如图1所示,正弦光栅被投影到传送带上,被测物体随传送带匀速运动,在垂直传送带方向上采用 CCD 以相同时间间隔依次拍摄物体表面变形条纹图,共拍摄5次,5 frame变形条纹图可表示为

$$I_n(x,y) = R(x,y) \{ A(x,y) + B(x,y) \cos[\phi(x,y) + (n-1)\varphi] \}, \quad (n=1,2,3,4,5) \quad (1)$$

式中 $R(x,y)$ 为物体表面反射率; $A(x,y)$ 为背景光强; $B(x,y)$ 为条纹对比度; $\phi(x,y)$ 为相位调制因子,包含物体的高度信息; φ 为物体等步距移动产生的等效相移。

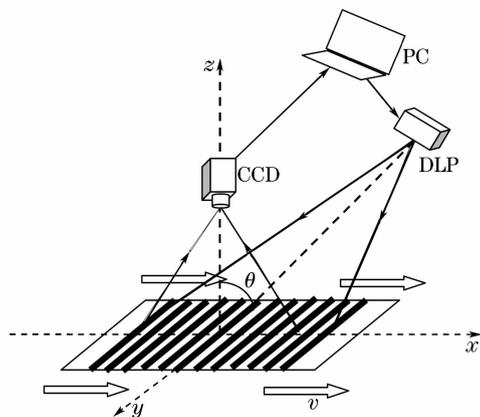


图1 在线 PMP 系统示意图
Fig. 1 On-line PMP system

由于物体相对 CCD 运动,CCD 采集的5 frame 变形条纹对应像素点的光强值并不对应同一物点,

即不同条纹图像像素坐标位置与物点位置不对应,因此需做像素匹配^[9]。通过获取物体等步距移动的像素量,使像素坐标位置与物点位置一一对应。像素匹配后得到的5 frame条纹图光强分布为 $I'_1(x,y), I'_2(x,y), \dots, I'_5(x,y)$, 根据 Stoilov 算法可解得相位分布

$$\Phi = \arctan \left[\frac{2(I'_2 - I'_4)}{2I'_3 - I'_1 - I'_5} \sin \varphi \right], \quad (2)$$

式中

$$\sin \varphi = \sqrt{1 - \left[\frac{I'_1 - I'_5}{2(I'_2 - I'_4)} \right]^2}. \quad (3)$$

由于受到环境光、系统数字化误差和探测器的非线性^[10]的影响,(3)式的计算结果可能会出现分母为零或复数的异常情况,影响相位的正确提取。为提高相位提取的正确性,可采用改进的 Stoilov 算法^[4-8]计算相移量。

根据(2)式计算得到的相位值被截断在反三角函数的主值区间 $-\pi \sim +\pi$ 之间,需要进行相位展开,以获得连续相位分布。展开后的连续相位 $\psi(x,y)$ 与物体的高度分布函数 $h(x,y)$ 间的关系为^[11]

$$\frac{1}{h(x,y)} = a(x,y) + b(x,y) \frac{1}{\psi(x,y)} + c(x,y) \frac{1}{\psi^2(x,y)}, \quad (4)$$

式中参数 $a(x,y), b(x,y), c(x,y)$ 通过系统标定获得。

3 投影光栅的校正

3.1 提高系统精度的分析

投影方向与参考面法线的夹角 θ 决定了 CCD 所获条纹图像等周期性的好坏,如图2所示, θ 越大,投影到参考面上的正弦条纹的等周期性越差。由于传送带以一定速度 v 匀速运动,CCD 拍摄频率

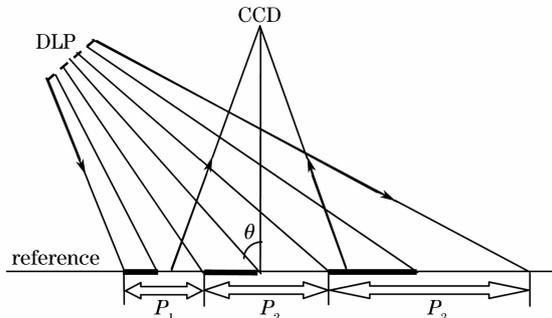


图2 发散照明系统
Fig. 2 Emanative illumination system

不变,条纹的不等周期分布直接导致像素匹配后相邻2 frame 图像之间的相移量不相等,无法满足 Stoilov 算法中等相移量的要求,会降低测量精度。

用主动修正投影光栅周期的方法,可以校正发散照明系统对参考面光栅图像不等周期的影响。即事先由计算机设计生成不等周期的光栅,经数字投影仪(DLP)投影后在参考平面形成等周期的正弦条纹。设计的投影光栅的不等周期度由测量系统的系统参数决定,需要对测量系统的参数进行测量,不能直接测量的参数可通过标定获得,但标定过程相当繁杂,有些参数甚至无法准确标定。

3.2 简便修正投影光栅周期的方法

经分析,投影仪发散投影到参考平面上的条纹周期大小近似呈线性变化,于是提出一种利用静态 PMP 分析参考平面截断相位分布,采用迭代算法逐步修正投影光栅周期的方法,使投影光栅的周期按 $P = Ax + p$ 规律变化,达到投影到参考面的光栅具有等周期特性的目的。 p 表示投影光栅的基本周期, A 表示光栅周期的变化率。可根据被测物的特征和大小确定 p 的值, A 的值需精确计算。由于系统参数不能精确确定,给 A 的计算带来一定难度,为此,可以采用迭代算法逐步修正 A 值。

分析可知,若参考平面上的正弦光栅像的周期 P_0 恒定不变,即等周期分布,则参考平面上的相位分布 $\psi(x, y)$ 是坐标 x 的线性函数,每一级次截断相位 Φ_n 的倾角 θ_n ($n = 1, 2, 3, \dots$ 代表第 n 级截断相位)都相等,如图3所示。绘出 $\tan \theta_n$ - n 曲线,经

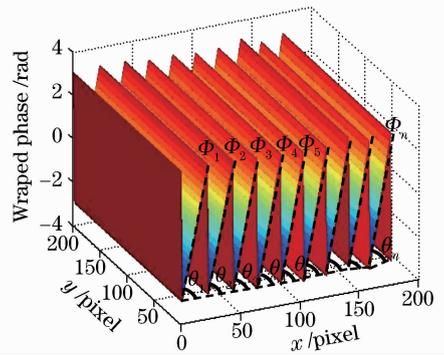


图3 平面的截断相位

线性拟合后其斜率 k 应该为0。若参考平面上的光栅像的周期为非等周期分布,以 $P_0 = mx + p_0$ 规律变化,则对 $\tan \theta_n$ - n 线性拟合后的斜率 $k \neq 0$ 且正负号与 m 相反。

由此获得 A 值的方法为:固定投影位置及投影角度,利用数字相移技术投影1 frame 标准等周期正弦光栅到参考平面,通过 CCD 获取参考平面上的非等周期条纹图,用数字图像技术分析、处理图像,估算出条纹图中光栅的近似周期分布 $P_0 = mx + p_0$ (p_0 表示第一级条纹的周期, x 表示像素坐标。 m 表示周期变化率,通常用拟合的方式估算得到)。取 k_0 为一任意常数,与 m 异号(以后的迭代过程中要用 k_0 的正负号作为判断依据),令 $A_1 = -m$,以 A_1 为迭代初值,经过迭代计算,得到 A 值。取一小量 ϵ ,其正负与 A_1 相同,迭代流程图如图4所示。具体迭代过程如下。

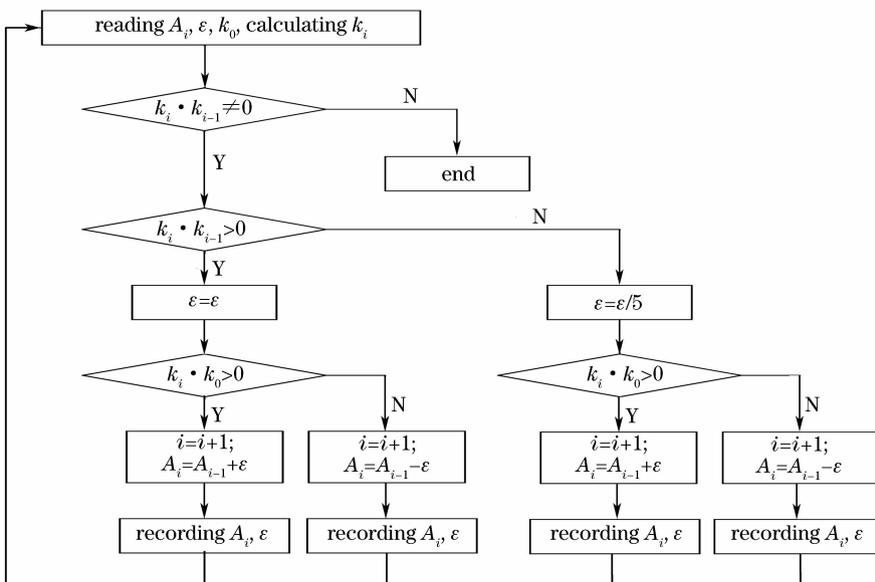


图4 迭代流程图

Fig. 4 Schematic diagram of the iterative algorithm

1) 读入 A_i, ϵ, k_0 , 计算机生成 N 帧满周期等相移的光栅, 其周期表示为 $P = A_i x + p$, 将其投影于参考平面, CCD 采集 N 帧条纹图并用满周期等相移算法算得参考平面的截断相位, 计算出每一级截断相位的倾角 $\tan \theta_m$ (i 代表迭代次数, $n = 1, 2, 3, \dots$ 表示截断相位的级次), 绘出曲线 $\tan \theta_m - n$ 并将其拟合为直线, 计算求得其斜率为 k_i 。若 $k_i = 0$, 说明参考面光栅像为等周期分布, 返回 A_i 的值, 此时 $A = A_i$, 结束修正过程; 若 $k_i \neq 0$, 执行步骤 2)。

2) 确定 ϵ 的大小:

a) 若 $k_i \cdot k_{i-1} > 0$, 则 $\epsilon = \epsilon$, 执行步骤 3);

b) 若 $k_i \cdot k_{i-1} < 0$, 则 $\epsilon = \epsilon/5$, 执行步骤 3)。

3) 判断 A_i 与 A 的逼近程度:

a) 若 $k_i \cdot k_0 > 0$, 说明光栅调整幅度不够, 此时 $i = i + 1, A_i = A_{i-1} + \epsilon$, 执行步骤 4);

b) 若 $k_i \cdot k_0 < 0$, 说明光栅调整幅度过大, 此时 $i = i + 1, A_i = A_{i-1} - \epsilon$, 执行步骤 4)。

4) 重新记录下当前的 A_i, ϵ , 重复步骤 1)。

4 实验及结果分析

为了验证该方法的有效性, 进行了实验验证。实验中所采用的 DLP 型号为 CP-HX6500, CCD 型号为 MTV1881EX, 其拍摄频率为 60 frame/s, 曝光

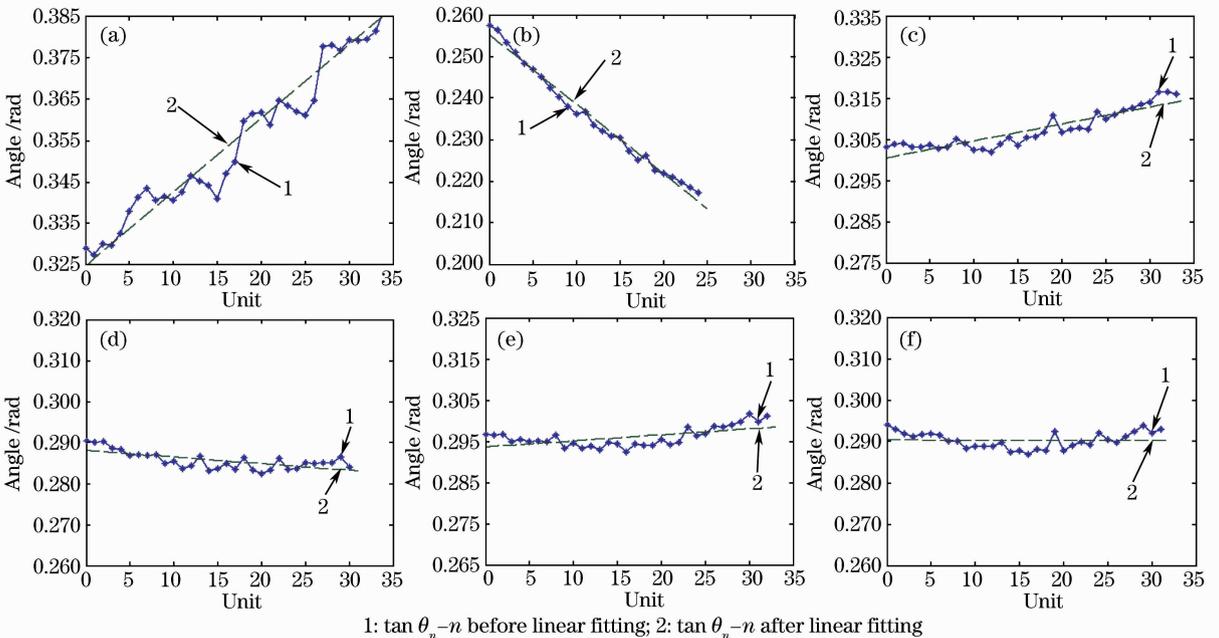
时间可以在 $1/50 \sim 1/10000$ s 选择, 本实验选定的曝光时间为 $1/500$ s。当投影等周期的正弦条纹后, 由 CCD 采集到的条纹图如图 5 所示。可明显看出 CCD 所获取的正弦条纹的周期特性发生了改变, 不再是等周期分布。



图 5 修正前条纹周期分布图

Fig. 5 Periodicity distribution of fringe before modification

分析图 5, 其周期 P_0 可近似表示为 $P_0 = -\frac{9}{400}x + 23$ (此处的分母 400 来源于图像像素大小, 以后迭代过程中生成投影图像的横向大小为 1024 pixel)。以 $A_1 = -(-\frac{9}{400})$ 为迭代初值, 绘出 $\tan \theta_n - n$ 曲线并通过拟合求其斜率 k , 不断修正 A



1: $\tan \theta_n - n$ before linear fitting; 2: $\tan \theta_n - n$ after linear fitting

图 6 不断修正 A 。(a) $P=4/1024x+10, k=0.0018$; (b) $P=10/1024x+10, k=-0.0017$; (c) $P=6/1024x+10, k=0.0004$; (d) $P=7/1024x+10, k=-0.0002$; (e) $P=6.5/1024x+10, k=0.0001$; (f) $P=6.75/1024x+10, k=0$

Fig. 6 Modify A continuously.

(a) $P=4/1024x+10, k=0.0018$; (b) $P=10/1024x+10, k=-0.0017$; (c) $P=6/1024x+10, k=0.0004$; (d) $P=7/1024x+10, k=-0.0002$; (e) $P=6.5/1024x+10, k=0.0001$; (f) $P=6.75/1024x+10, k=0$

值。为了提高抗随机干扰能力,对 50 行数据取平均值得到 $\tan \theta_n (n = 1, 2, 3, \dots)$ 。图 6 表示迭代过程。图 7 为修正后参考平面上光栅的周期分布,具有良好的等周期性。

为了进一步验证该方法的有效性,进行了实物测量,将高度分别为 5, 10, 16, 20 mm 的块规置于参考平面上,随参考面匀速运动。测量过程中分别投影等周期光栅和经过修正后的光栅,并对测量结果进行了比较,如表 1 和表 2 所示。当投影方向与光轴的夹角 θ 较小时,测量精度如表 1 所示。改变投影仪的投影位置及方向,增大 θ ,测量精度如表 2 所示。

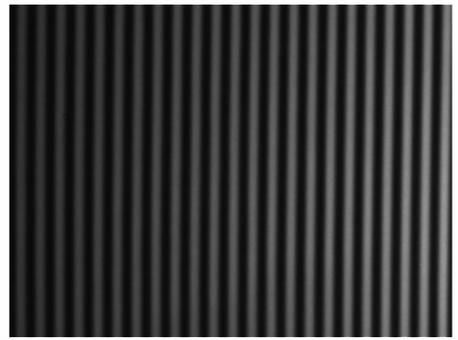


图 7 修正后条纹周期分布图

Fig. 7 Periodicity distribution of fringe after modification

表 1 小偏角投影的测量误差

Table 1 Measurement error of small tilting angle projection

Height /mm	Grating before modification				Grating after modification			
	5	10	16	20	5	10	16	20
Mean absolute error /mm	0.2187	0.1507	0.1502	0.1242	0.1403	0.1227	0.1156	0.1015
Root mean square /mm	0.2642	0.1807	0.1816	0.1522	0.1709	0.1476	0.1396	0.1263

表 2 大偏角投影的测量误差

Table 2 Measurement error of large tilting angle projection

Height /mm	Grating before modification				Grating after modification			
	5	10	16	20	5	10	16	20
Mean absolute error /mm	0.1169	0.0886	0.0985	0.0935	0.0862	0.0551	0.0571	0.0608
Root mean square /mm	0.1410	0.1104	0.1202	0.1134	0.1075	0.0681	0.0699	0.0734

由表 1, 2 的数据可知,无论投影角度如何,用主动修正光栅的方法都可以有效地提高测量精度,计算得到投影修正光栅可使测量均方差平均降低 0.045 mm。

5 结 论

在在线三维测量系统中,提出主动修正投影正弦光栅周期的方法来解决物体位移相等但转换成等效相移不相等的问题。修正过程采用静态 PMP 分析参考平面截断相位、迭代算法逐步修正的手段,避免了光栅修正过程中对系统参数的测量和计算。该方法有效抑制了发散照明引起的参考平面条纹的不等周期,保证了采集系统获得的条纹相移量的恒定性,提高了在线三维测量的适应度和测量精度。对标准平面的测量结果显示均方差平均降低 0.045 mm。

参 考 文 献

1 Fu Yanjun, Yang Kuntao. Imaging theory research of projection moire method [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(4):521~525
伏燕军,杨坤涛. 投影型莫尔法的成像理论研究[J]. *中国激光*,

2006, **33**(4):521~525
2 Cheng Xusheng, Cao Yiping, He Yuhang. A three-dimensional reconstructed method of big scale objects based on the maximum of an area modulation sum [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(3):784~788
程旭升,曹益平,何宇航. 基于区域调制和最大化的大尺寸物体三维重构[J]. *中国激光*, 2010, **37**(3):784~788
3 Li Yonghuai, Feng Qibo. Overview of optical 3D profile measurement [J]. *Laser & Infrared*, 2005, **35**(3):143~147
李永怀,冯其波. 光学三维轮廓测量技术进展[J]. *激光与红外*, 2005, **35**(3):143~147
4 G. Stoilov, T. Dragostinov. Phase-stepping interferometry: five-frame algorithm with an arbitrary step [J]. *Opt. & Lasers in Engng.*, 1997, **28**(1):61~69
5 Yu Ruizhi, Cao Yiping. A three dimensional on-line inspecting method for workpiece by PMP [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(6):1139~1143
喻睿智,曹益平. 一种采用相位测量轮廓术的工件在线三维检测方法[J]. *光子学报*, 2008, **37**(6):1139~1143
6 Qian Kemao, Wu Xiaoping. Theoretical analysis of Stoilov algorithm in phase shifting interferometry [J]. *Optical Technique*, 2001, **27**(1):13~16
钱克矛,伍小平. 相移技术中五步等步长 Stoilov 算法的性能分析[J]. *光学技术*, 2001, **27**(1):13~16
7 Xu Xingfen, Cao Yiping. An improved Stoilov algorithm based on statistical approach [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(3):733~737
许幸芬,曹益平. 基于统计逼近的 Stoilov 改进算法[J]. *光学学报*, 2009, **29**(3):733~737
8 Zhong Lijun, Cao Yiping, Yu Ruizhi. Improved algorithm

adapting to on-line 3D inspection [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(6):1503~1507
 钟立俊,曹益平,喻睿智. 一种适合在线三维检测的改进算法[J]. *中国激光*, 2009, **36**(6):1503~1507
 9 Wu Jianning, Guo Baolong, Feng Zongzhe. An image mosaic technique based on interest points feature matching [J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2006, **17**(6):733~737
 仵建宁,郭宝龙,冯宗哲. 一种基于兴趣点特征匹配的图像镶嵌技术[J]. *光电子·激光*, 2006, **17**(6):733~737

10 Zhou Libing, Su Xianyu, Wang Liwu. Analysis of errors introduced by detector nonlinearity in phase measuring profilometry [J]. *Laser Journal*, 2002, **23**(3):19~21
 周利兵,苏显渝,王立无. 相位测量轮廓术中探测器非线性误差的分析[J]. *激光杂志*, 2002, **23**(3):19~21
 11 Li Wansong, Su Xianyu, Liu Zhoubao. Large-scale three-dimensional object measurement: a practical coordinate mapping and image data-patching method [J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(20):3326~3333

850 MHz 高重复频率、窄线宽被动锁模皮秒脉冲光纤激光器

高功率超短脉冲光纤激光器,通常由低功率种子源和多级功率放大器组成。低功率种子源决定了激光的输出波长、脉冲宽度、重复频率等关键性能,而功率放大器决定了激光输出的平均功率、脉冲能量和峰值功率等。由于高功率超短脉冲光纤激光器的重复频率一般在 500 kHz~100 MHz 之间,所以其平均输出功率小于百瓦量级。在保持同等激光峰值功率的情况下,为了得到更高的平均输出功率,可通过增加激光脉冲的重复频率或脉冲宽度来实现。目前,常用的高重复频率的种子源主要有脉冲增益开关半导体激光器、被动锁模的垂射外腔面发射激光器(VECSEL),以及谐波被动锁模的光纤激光器等。

北京工业大学高功率光纤激光课题组采用结构紧凑的线形腔,成功实现了 850 MHz 高重复频率、

窄线宽半导体可饱和吸收镜(SESAM)锁模的皮秒脉冲光纤激光输出。当光纤激光谐振腔约为 20 cm 长时,得到了稳定的重复频率为 490 MHz 的锁模激光脉冲,其重复频率基本与激光谐振腔的长度相吻合。激光的中心波长为 1064.2 nm,3 dB 光谱带宽为 0.14 nm,脉冲宽度约为 21 ps,锁模激光脉冲的信噪比大于 55 dB,如图 1 所示。进一步缩短光纤激光谐振腔的长度后,得到了稳定的重复频率高达 850 MHz,3 dB 光谱带宽为 0.13 nm 的锁模激光脉冲。采用如此高重复频率的皮秒脉冲光纤激光器作种子源,经过多级光纤放大器之后,最高平均输出功率有望达到 300~400 W。该高重复频率、窄线宽、被动锁模皮秒脉冲光纤激光器具有巨大的实际应用前景。

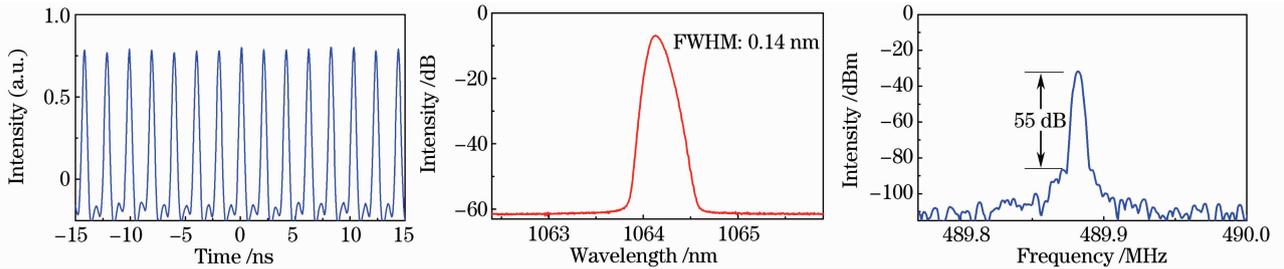


图 1 高重复频率锁模光纤激光器输出特性图

Fig. 1 Main output characteristics of high repetition rate mode-locked fiber laser

刘 江 王 璞

(北京工业大学激光工程研究院国家产学研激光技术中心,北京 100124)

收稿日期: 2011-07-14