

超短脉冲数字全息术中的立体角分复用技术^{*}

王晓雷 翟宏琛[†] 王 毅 母国光

(南开大学现代光学研究所, 天津 300071)

(教育部光电信息技术科学重点实验室, 天津 300071)

(2005 年 1 月 21 日收到, 2005 年 9 月 12 日收到修改稿)

将角分复用技术应用于超短脉冲数字全息术, 可实现对超快过程的动态记录. 其中, 在角分复用的设计中, 由于 CCD 像素尺寸的限制, 一般对物光和参考光的角度要求较为苛刻. 为此, 提出了一种立体角分复用的方法, 并使用连续激光数字全息实验验证了这种方法的有效性. 在此基础上, 根据超短脉冲数字全息术记录超快过程的特点, 设计了能够实现自动连续进行立体角分复用记录的光路. 计算分析表明, 该光路可在—帧数字全息图上连续记录间隔为纳秒量级的多幅超快过程的动态图像.

关键词: 超短脉冲数字全息术, 立体角分复用, 超快过程

PACC: 4230D, 4240H, 4280W

1. 引 言

由于近十年来超短脉冲激光技术^[1,2]及 CCD 技术的迅速发展, 利用超短脉冲数字全息术记录和再现超快动态过程^[3,4]已逐渐显示出了其不可取代的优越性. 据报道, 目前在国际上已有美国加州理工学院 Psaltis 的实验室正在开始应用超短脉冲数字全息术记录及再现超快过程的研究^[5].

利用超短脉冲数字全息术, 可在极短的时间内对超快变化的物场连续进行多次曝光, 从而可将物光脉冲串和参考光脉冲串干涉所得到的多幅全息图记录在 CCD 光敏面上. 由于超快过程的时间间隔一般在纳秒或更短的时间范围内, 而普通 CCD 的帧频因电荷积累时间(20ms 或 40ms)的限制无法与之匹配, 因此只能利用角分复用技术将多幅超快过程的全息干涉条纹记录在 CCD 的同一帧图像上, 从而得到一张包含多张子全息图的复合全息图. 再现时, 可利用子全息图在频谱空间分离的特性, 使用数字滤波方法^[6,7]对全息图进行分频及相应的再现衍射光场的数字计算, 从而将多幅再现图像同时或分别输出到显示器上.

但是, 由于 CCD 像素尺寸的限制, 对物光和参考光之间的夹角要求非常苛刻^[8,9], 因此使角分复用

技术应用于记录超快过程的数字全息术受到一定的限制. 为此, 本文提出一种针对超短脉冲数字全息术的立体角分复用方法. 使用连续激光的数字全息实验的结果验证了该方法在数字分频方面的可行性, 并能提高数字再现的分辨率. 在此基础上, 我们根据超短脉冲数字全息术记录超快过程的要求, 设计了可实现自动立体角分复用记录功能的光路. 计算分析表明, 它可在—帧数字全息图上, 对超快过程进行纳秒量级间隔的连续记录.

2. 立体角分复用方法

利用角分复用技术将多幅超快过程的全息干涉条纹记录在 CCD 的同一帧图像上的过程要求在前两次记录的纳秒量级或更短的时间间隔内, 在保持物光脉冲方向不变的同时, 依次改变参考光脉冲的入射方向, 使记录在 CCD 的同一帧图像上的不同全息图具有不同的空间频率, 因此可在再现的过程中, 应用数字滤波方法将上述不同的全息图在频谱空间进行过滤分离, 然后对滤出的频谱进行相应的再现衍射光场的数字计算.

全息图的干涉条纹方程为 $\Lambda = \lambda / \sin\theta$ (其中 Λ 和 θ 分别为条纹周期和物光与参考光间的夹角), 为满足 Nyquist 采样定理, 一个条纹周期至少应覆盖两

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 60377008)和天津市自然科学基金(批准号: 043800611)资助的课题.

[†] E-mail: zhai@nankai.edu.cn

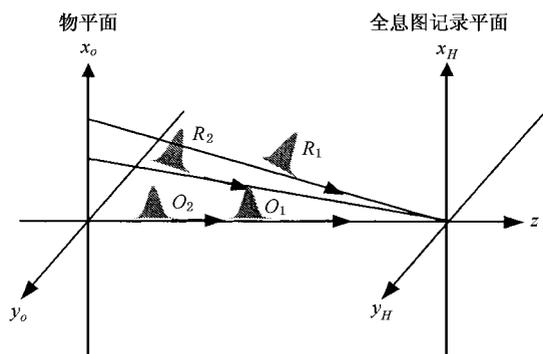


图 1 平面角分复用示意图

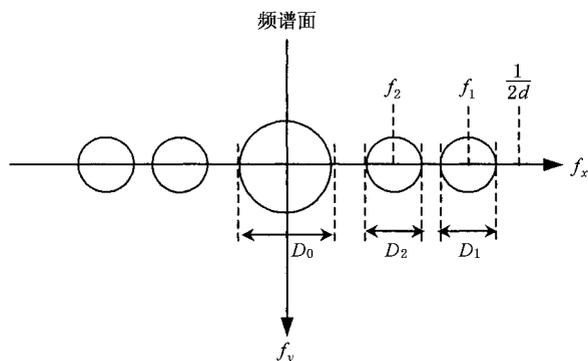


图 2 平面角分复用全息图频谱分布 $D_0: \max[f_{1\max}, f_{2\max}]$; $D_1: 2f_{1\max}$; $D_2: 2f_{2\max}$; d : CCD 像元尺寸

个光敏单元,即 $\Delta = \lambda / \sin\theta > 2d$ (其中 d 为光敏单元尺寸),因此得到

$$\sin\theta < \lambda / 2d. \tag{1}$$

由于目前 CCD 的分辨率一般为 100 线/mm(比传统的全息记录材料约低一个数量级),因此数字全息中物光和参考光间的夹角 θ 必须很小,例如当 $\lambda = 800\text{nm}$, $d = 10\mu\text{m}$ 则要求 $\theta < 0.04\text{rad}$ (约为 2.3°).在如此小的角度范围内进行平面角分复用记录,这将对参考光的角度有很苛刻的要求.例如平面角分复用光路如图 1 所示,物平面为 $x_o y_o$ 平面,记录全息图的 CCD 光敏面为 $x_H y_H$ 平面,两束平面波脉冲参考光 R_1 和 R_2 均位于 $x_o z$ 面内,设 R_1, R_2 与 z 轴的夹角分别 θ_1 和 θ_2 ,那么两束参考光可以表示成

$$\begin{aligned} R_1 &= R_0 \exp(j2\pi x_H f_1), \\ R_2 &= R_0 \exp(j2\pi x_H f_2), \end{aligned} \tag{2}$$

其中 $f_1 = \sin\theta_1 / \lambda$, $f_2 = \sin\theta_2 / \lambda$.由全息理论可知,此时包含两张子全息图的复合全息图光强分布应为

$$\begin{aligned} I(x, y) &= |O_1|^2 + |O_2|^2 + 2R_0^2 \\ &+ R_0 O_1^*(x_H, y_H) \exp(-j2\pi x_H f_1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &+ R_0 O_1^*(x_H, y_H) \exp(j2\pi x_H f_1) \\ &+ R_0 O_2^*(x_H, y_H) \exp(-j2\pi x_H f_2) \\ &+ R_0 O_2^*(x_H, y_H) \exp(j2\pi x_H f_2). \end{aligned} \tag{3}$$

对上式进行傅里叶变换,得

$$\begin{aligned} U(f_x, f_y) &= F[I(x, y)] \\ &= U_0(f_x, f_y) + U_1(f_x + f_1, f_y) \\ &+ U_1(f_x - f_1, f_y) + U_2(f_x + f_2, f_y) \\ &+ U_2(f_x - f_2, f_y), \end{aligned} \tag{4}$$

式中的后四项分别对应(3)式中后四项的傅里叶变换.

当这两张子全息图所记录的物光波为限带函数时,则可以设它们的频谱宽度分别为 $-f_{1\max}$ 到 $f_{1\max}$ 以及 $-f_{2\max}$ 到 $f_{2\max}$,那么(4)式的结果便如图 2 所示.两张子全息图的 ± 1 级频谱均位于 f_x 轴上,它们相对 f_x 轴原点的距离分别为 f_1 和 f_2 ,其大小分别由 θ_1 和 θ_2 所决定.

为了进行频谱滤波,我们希望两张子全息图的 ± 1 级彼此能够分离,而且它们与零级也能分离,因此必须满足 $f_1 - f_2 > f_{1\max} + f_{2\max}$ 和 $f_2 > 2\max[f_{1\max}, f_{2\max}] + f_{2\max}$.将 $f_1 = \sin\theta_1 / \lambda$ 和 $f_2 = \sin\theta_2 / \lambda$ 带入整理得

$$\sin\theta_1 - \sin\theta_2 > \lambda(f_{1\max} + f_{2\max})$$

且

$$\sin\theta_2 > 2\lambda \max[f_{1\max}, f_{2\max}] + \lambda f_{2\max}. \tag{5}$$

因此,综合(1)和(5)式,可得到在数字全息中应用平面角分复用技术时参考光 R_1 和 R_2 应满足的关系

$$\begin{aligned} \lambda / 2d > \theta_1 > \lambda(f_{1\max} + f_{2\max}) + \theta_2 \text{ 和} \\ \theta_2 > 2\lambda \max[f_{1\max}, f_{2\max}] + \lambda f_{2\max}. \end{aligned} \tag{6}$$

可见,在数字全息中应用平面角分复用技术时, R_1 和 R_2 的角度会被限制在很苛刻的范围内.如果不满足(6)式,就会造成无法采样或频谱重叠的现象发生.此时如果在 $x_o z$ 面内还有第三束参考光,则根据上面的论述可知,该参考光的角度将会被限制在更加严格的角度范围内.

为此,本文提出一种立体角分复用的方法,其光路如图 3 所示.用于角分复用的三束平面波脉冲参考光为 R_1, R_2 和 R_3 ,其中 R_1 在 $x_o z$ 面上, R_3 位于 $y_o z$ 面上, R_2 位于 R_1 和 R_3 所决定的平面内.设三束参考光的传播方向与 z 轴的夹角分别为 θ_1, θ_2 和 θ_3 ,并且参考光 R_2 与 x_H 轴和 y_H 轴的夹角分别为 α 和 β ,则参考光 R_2 可以表示为 $R_2 = R_0 \exp[j2\pi$

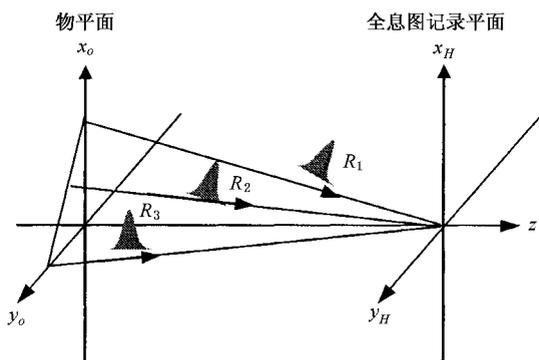


图 3 立体角分复用示意图

同取向的光栅结构^[10-13],因此其频谱沿 $f_y = 0$ 至 $f_x = 0$ 方向分布,如图 4 所示.显然,这种频谱分布更易于进行后续的分频处理.特别是,当 α 和 β 相等时,由参考光 R_2 所形成的子全息图的频谱的 ± 1 级正好位于 f_x 轴和 f_y 轴夹角的角平分线上,那么只要此三束参考光能满足 $\lambda/2d > \theta_i > 3\lambda f_{\max}$ ($i = 1, 2, 3$) 的条件,各子全息图的频谱便不会重叠,从而获得理想的滤波效果.显然,与平面角分复用相比,立体角分复用方法能够放宽对角度的严格限制,使光路设计具有更大的自由度,从而使分频及后续的分立显示获得更加满意的结果.

3. 立体角分复用记录及分频再现实验

为比较两种记录方法的再现效果,我们采用连续激光模拟超短脉冲激光,按图 1 和图 3 所示的光路安排,在 CCD 的同一帧图像上,分别采用平面角分复用和立体角分复用方法,记录了相同物光源的两组复合全息图.其中在立体角分复用的模拟实验中,两束参考光的布置按照图 3 中的 R_1 和 R_3 所示.在两种模拟实验中,除记录参考光的复用方法不同外,其他记录条件完全相同.即在记录中物光源均为中心位于 z 轴的、并被平行光照明的透明五角星和圆环,如图 5、6 所示;CCD 光敏面位于 $x_H y_H$ 平面,其与物平面的距离为 55cm.实验中使用的 CCD 其型号为 MINTON-MTV-1881,其像素大小为 $10\mu\text{m} \times 10.8\mu\text{m}$,像素数为 $768(\text{H}) \times 576(\text{V})$.

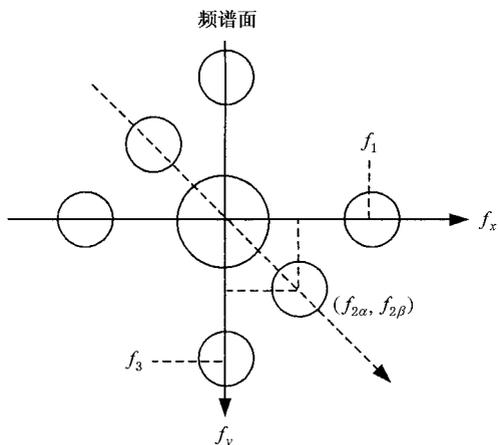


图 4 立体角分复用全息图频谱分布

$\times(x_H f_{2\alpha} + y_H f_{2\beta})$],其中 $f_{2\alpha} = \cos\alpha/\lambda$, $f_{2\beta} = \cos\beta/\lambda$, 则包含三张子全息图的复合全息图的光强为

$$\begin{aligned}
 I(x, y) &= |O_1|^2 + |O_2|^2 + |O_3|^2 + 3R_0^2 \\
 &+ R_0 O_1(x_H, y_H) \exp(-j2\pi x_H f_1) \\
 &+ R_0 O_1^*(x_H, y_H) \exp(j2\pi x_H f_1) \\
 &+ R_0 O_2(x_H, y_H) \exp[-j2\pi(x_H \cos\alpha/\lambda + y_H \cos\beta/\lambda)] \\
 &+ R_0 O_2^*(x_H, y_H) \exp[j2\pi(x_H \cos\alpha/\lambda + y_H \cos\beta/\lambda)] \\
 &+ R_0 O_3(x_H, y_H) \exp(-j2\pi y_H f_3) \\
 &+ R_0 O_3^*(x_H, y_H) \exp(j2\pi y_H f_3). \tag{7}
 \end{aligned}$$

对上式做傅里叶变换可得

$$\begin{aligned}
 U(f_x, f_y) &= U_0(f_x, f_y) + U_1(f_x + f_1, f_y) + U_1(f_x - f_1, f_y) \\
 &+ U_2(f_x + f_{2\alpha}, f_y + f_{2\beta}) \\
 &+ U_2(f_x - f_{2\alpha}, f_y - f_{2\beta}) \\
 &+ U_3(f_x, f_y + f_3) + U_3(f_x, f_y - f_3). \tag{8}
 \end{aligned}$$

从(8)式的结果可以看出,三张子全息图具有不



图 5 五角星图案

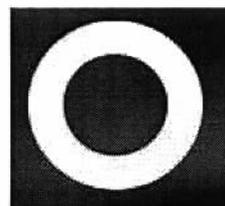


图 6 圆环图案

在平面角分复用实验中,两束参考光与物光的夹角分别为 0.026rad 和 0.015rad ,所得到复合全息图的频谱分布如图 $7(a_1)$ 所示.可以看出,此时两张子全息图的频谱边缘已经重叠,因此很难“干净”地滤出需要的频谱,其再现结果也受到了影响,如图 $7(a_2)$ 和 (a_3) 所示.在立体角分复用的实验中,两束参考光与物光的夹角分别为 0.025rad 和 0.017rad ,其全息图频谱如图 $7(b_1)$ 所示.可以清楚地看出,两幅

子全息图的频谱在空间上很好地分离了,因此能得到较理想的再现结果.图 $7(b_2)$ 为利用水平方向频谱再现的结果,图 $7(b_3)$ 为利用竖直方向频谱再现的结果.以上结果验证了在相同的记录条件下,采用立体角分复用方法较采用平面角分复用方法更容易对复用记录的结果进行分频,从而易于对采用脉冲激光记录的一幅复合全息图中的子全息图分别进行再现.

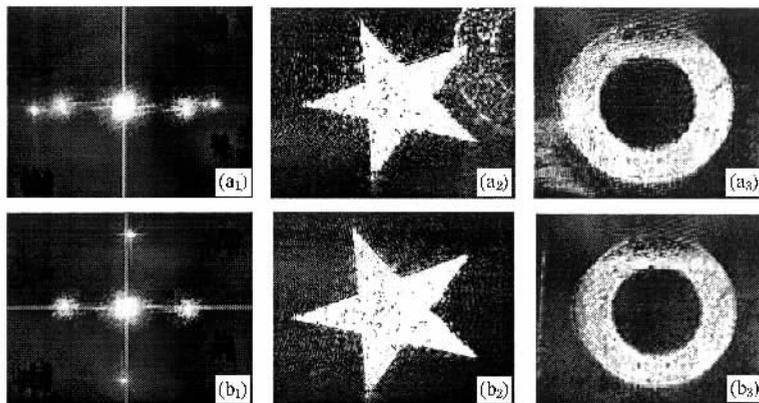


图7 平面角分复用和立体角分复用模拟实验结果比较 (a_1):平面角分复用复合全息图频谱分布 (a_2):基于图(a_1)的图5再现结果; (a_3):基于图(a_1)的图6再现结果 (b_1):立体角分复用复合全息图频谱分布 (b_2):基于图(b_1)的图5再现结果 (b_3):基于图(b_1)的图6再现结果

4. 角分复用超短脉冲数字全息光路

在上述分析的基础上,本文设计了应用立体角分复用技术记录超快过程的超短脉冲数字全息光路,如图8所示.该光路可实现对单脉冲的自动分割,产生具有一定延迟的角度不变物光子脉冲和角度多重的参考光子脉冲,并实现立体角分复用的超短脉冲数字全息纪录.

在图8(a)所示的光路中,参考光脉冲经反射镜 M_1 反射进入参考光多脉冲发生腔.上下两个反射镜分别位于两个凸透镜的焦点处. M_1 的放置角度,应能使经它反射后的光脉冲的反向延长线,正好通过下面反射镜的中心.如果上下两个反射镜相互平行,则光脉冲经过两次反射后,将重复先前的路径,并入射到 M_1 的后表面,则脉冲被阻断.为此,微旋反射镜 M_2 ,使其打破参考光多脉冲发生腔的上述平衡,则脉冲入射到该镜后,能向近轴方向偏转一个微小的角度,再经反射后能刚好错过 M_1 ,形成振荡,从而产生角度多重的脉冲序列.该振荡腔的平面平行于水平面,因此它产生的子脉冲均位于水平面上,即

在 xy 面内,它们以不同的角度入射到 CCD 光敏面,如图8(b)所示.

根据计算,脉冲之间时间延迟应取决于后续子脉冲在腔内振荡所需一次往返的时间,由腔长所决定.设单次振荡的等效光程为 L ,那么时间延迟应为 $\Delta t = 2L/c$ (其中 c 为光在真空中的速度),若 $L = 50\text{cm}$,则时间延迟约为 3.3ns .可见,通过选择合适的腔长可使延迟控制在纳秒或更短的时间范围内.

在物光光路中,设物光的振动方向垂直于纸面,它被偏振分束镜全反射后进入物光多脉冲发生腔,经两次通过 pockels 盒后 pockels 盒关闭.由于此时光脉冲偏振方向已由垂直于纸面变成平行于纸面,因此再经过一个四分之一波片后,会有部分能量被反射出物光腔,形成一个子脉冲,分振幅后的脉冲将继续在腔中振荡而依次产生后续的类似子脉冲串.由于子脉冲间的时间间隔同样取决于腔的长度,因此,根据同样的分析计算可知,可被控制在纳秒数量级的范围内.

在我们的设计中,为实现立体角分复用技术,在物光入射到 CCD 靶面之前,用一个光束提升器将物光脉冲提起,然后使其沿一倾斜方向入射到 CCD 靶

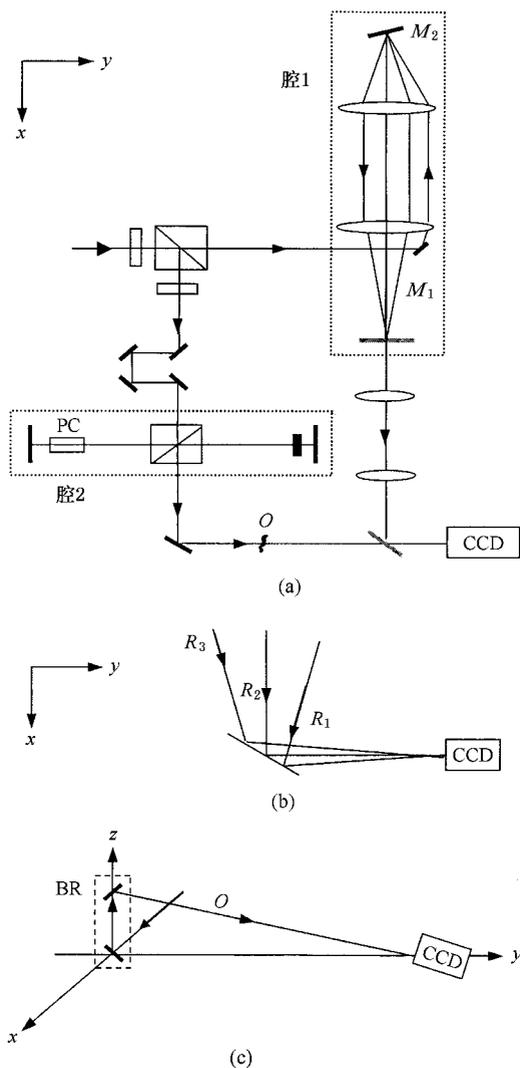


图 8 角分复用超短脉冲数字全息光路图 (a)角分复用超短脉冲数字全息光路 (b)角度多重参考光子脉冲入射到 CCD 光敏面的示意图 (c)物光脉冲入射到 CCD 光敏面示意图;腔 1:参考光脉冲发生腔;腔 2:物光脉冲发生腔;PC:pockels 盒;BR:光束提升器;□:半波片;■:四分之一波片;▣:反射镜;□:部分反射镜;◇:偏振分束器

面上,如图 8(c)所示.这样物光 O 的基频与 R_1, R_2 及 R_3 的传播方向便构成了如图 3 所示的立体角分复用光路,实现了立体角分复用记录功能.

采用上述立体角分复用光路记录的脉冲数字全息实验已获得初步结果,其结果将在另文分析及讨论.

5. 结 论

本文针对数字全息的特点,提出了立体角分复用的记录方法,并对其在超短脉冲数字全息中的应用进行了理论分析和模拟实验验证.结果表明,该方法放宽了对角度的严格限制,使光路设计具有更大的自由度,从而使高频及后续的分立显示会获得更加满意的结果.在此基础上,根据超短脉冲数字全息术记录超快过程的特点,设计了一个能够实现自动立体角分复用的超短脉冲数字全息纪录光路.分析计算表明,该光路可在 CCD 的一帧图像上自动连续记录间隔为纳秒量级的多幅超快过程的动态全息图像.

作者感谢与首都师范大学物理系张岩教授的讨论中得到的帮助.

[1] Wang Y S, Cheng G H, Liu Q et al 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 87 (in Chinese) 王屹山、程光华、刘青等 2004 物理学报 **53** 87]
 [2] Zhao Q Z, Qiu J R, Zhao C J et al 2005 *Chin. Phys.* **14** 1181
 [3] Schedin S, Pedrini G, Tiziani H et al 2001 *Appl. Opt.* **40** 100
 [4] Cucho E, Bevilacqua F, Depeursinge C 1999 *Opt. Lett.* **24** 291
 [5] Liu Z, Centurion M, Panotopoulos G et al 2002 *Opt. Lett.* **27** 22
 [6] Xiao T Q, Xu Z Z, Chen J W et al 1995 *Acta Opt. Sin.* **15** 129 [in Chinese] 肖体乔、徐至展、陈建文等 1995 光学学报 **15** 129]

[7] Cucho E, Marqut P, Depeursinge C 2000 *App. Opt.* **39** 4070
 [8] Schnars U, Juptner W 1994 *Appl. Opt.* **33** 4373
 [9] Schnars U, Juptner W 1994 *Appl. Opt.* **33** 179
 [10] Zhai H C, Li H L, Zhu X S et al 1998 *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Nankaiensis* **31** 4 [in Chinese] 翟宏琛、李海龙、朱秀山等 1998 南开大学学报 **31** 4]
 [11] Mu G G, Wang J Q, Fang Z L et al 1983 *Chinese Journal of Scientific Instrument* **4** 125 [in Chinese] 母国光、王君庆、方志良等 1983 仪器仪表学报 **4** 125]

[12] Mu G G , Fang Z L , Wang J Q *et al* 1989 *Chin. Patent*
CN1003811B E28 [in Chinese] 母国光、方志良、王君庆等 1989

中国专利 审定号 CN1003811B E28]

[13] Mu G G , Fang Z L *et al* 1995 *Sep.* 19 U. S. Patent 5 452 002

Spatially angular multiplexing in ultra-short pulsed digital holography^{*}

Wang Xiao-Lei Zhai Hong-Chen[†] Wang Yi Mu Guo-Guang

(*Institute of Modern Optics , Nankai University , Tianjin 300071 ,China*)

(*Key Laboratory of Optoelectronic Information Science & Technology , Ministry of Education of China , Tianjin 300071 ,China*)

(Received 21 January 2005 ; revised manuscript received 12 September 2005)

Abstract

Ultra-fast dynamic process can be recorded by ultra-short pulsed digital holography with angular multiplexing technique , in which the angle between reference beam and object beam has to be restricted to within a few degrees due to the restricted pixel size of CCD in the recording. In this report , spatially angular multiplexing technique is introduced , and the its applicability has been proved through a simulation experiment of digital holography with CW laser. Besides , optical set-up based on this technique is designed. Computation result shows that a series of dynamic multi-images in nanosecond time scale of ultra-fast process can be automatically recorded on a piece of digital hologram.

Keywords : ultra-short pulsed digital holograph , spatially angular multiplexing , ultra-fast events

PACC : 4230D , 4240H , 4280W

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60377008) and the Natural Science Foundation of Tianjin , China (Grant No. 043800611).

[†] E-mail : zhai@nankai.edu.cn