

doi: 10.3788/gzxb20144307.0706012

基于液晶空间光调制器的脉冲整形系统 校准及应用

安国, 闫娟娟, 刘娅

(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100191)

摘 要: 搭建了反射式光脉冲整形系统, 通过改变加载到液晶空间光调制器各像素点的调制电压, 测定系统分辨率及调制电压与输出信号光强和相位变化的关系, 并对液晶空间光调制器进行校准. 实验结果表明: 光强随调制电压周期变化, 相位随调制电压非线性变化; 系统分辨率为 10 GHz, 像素调制间隔为 0.08 nm, 即能够实现对频率间隔 10 GHz 的光信号的调制. 应用该系统, 以谱线间隔为 10 GHz 的光学频率梳为信号源, 对脉冲频谱进行整形, 产生了平坦、高斯型、三角、倒三角及光学频率梳信号.

关键词: 光脉冲整形; 液晶空间光调制器; 像素校准; 幅度调制; 相位调制

中图分类号: TN914

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)07-0706012-6

Calibration and Application of Optical Pulse Shaping System based on Liquid Crystal Spatial Light Modulator

AN Guo, YAN Juan-juan, LIU Ya

(School of Electronic and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: A reflective optical pulse shaping system based on liquid crystal spatial light modulator was built. With changing the modulation voltage loading into the pixel on the liquid crystal spatial light modulator, the system resolution and the relationship between the output including intensity and phase and the modulation voltage were measured. And the modulator's calibration was discussed. The results show that the intensity changes with modulation voltage linearly, while the phase is nonlinear. The frequency resolution of pulse shaping system is 10 GHz, corresponding 0.08 nm wavelength resolution, which can realize the modulation of optical signal with frequency interval of 10 GHz. An optical frequency comb with 10 GHz spectral spacing was adopted as the light source. Spectrum shaping was performed and flat spectrum, Gaussian spectrum, triangular spectrum and inverted triangle spectrum were generated experimentally.

Key words: Optical pulse shaping; Liquid Crystal Spatial Light Modulator(LCSLM); Pixels calibration; Intensity modulation; Phase modulation

OCIS Codes: 060.4510; 320.5540; 060.2630

0 引言

皮秒甚至飞秒量级的超短光脉冲产生技术推动了超短光脉冲在高速光通信、全光开关、超快激光光谱学及非线性光纤光学等领域的应用, 成为目前的热点之一^[1]. 实际应用中, 科研人员对超短光脉冲形状的要求不同, 因此需要通过整形技术对超短光脉冲进行整

形^[2]. 根据使用的调制器和整形原理, 脉冲整形可分为电光晶体原理、双折射原理和傅里叶变换原理三大类^[3]. 基于电光调制器的脉冲整形方法, 其整形光脉冲形状和宽度主要取决于以驱动电光波导调制器的整形电脉冲的形状和宽度^[4], 在飞秒领域无法使用. 利用双折射或其它非线性效应实现脉冲整形的方法, 由于非线性系统本身对功率非常敏感, 操作要求苛刻, 在低功率

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(No. 2012CB315601), 国家自然科学基金项目(No. 61201155)资助

第一作者: 安国(1983-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光脉冲整形技术与应用. Email: sy1102101@ee.buaa.edu.cn

导师(通讯作者): 闫娟娟(1976-), 女, 副教授, 主要研究方向为光电信息处理技术. Email: yanjuanjuan@buaa.edu.cn

收稿日期: 2013-11-04; 录用日期: 2014-02-27

<http://www.photon.ac.cn>

系统中无法使用^[3]. 基于信号的时域与频域傅里叶互换原理实现脉冲整形所利用的核心器件是液晶空间光调制器(Liquid Crystal Spatial Light Modulator, LC-SLM). 该器件由许多像素构成, 每个像素独立工作, 基于电光效应, 通过改变加载到每个像素上的调制电压, 可实现对输入光脉冲频谱幅度及相位的整形, 产生任意光脉冲. 系统中, LC-SLM 的每个像素点在外加调制电压作用下的工作特性是系统设计与应用的关键. 20世纪80年代末, 美国普渡大学的 A. M. Wenier 研究组首次利用这种技术实现了飞秒脉冲的整形^[5]. 由于基于空间光调制器的 $4-f$ 脉冲整形系统具有零色散^[6]、可调光谱范围宽、实验中无需移动光路等优点, 被广泛应用于超快科学研究和光通信领域^[7].

本文在 $4-f$ 脉冲整形系统工作原理的基础上, 搭建了反射式光脉冲整形系统, 给出了 SLM 的校准原理与方法, 通过实验完成了像素的校准, 并基于校准结果, 采用 $4-f$ 系统实现了几种不同脉冲波形的产生.

1 液晶调制器的光脉冲整形系统

基于 LC-SLM 的脉冲整形系统是将时域光信号变换到频域, 再对各个频谱分量进行调制, 在频域内调制后的信号再次经过傅里叶反变换到时域内输出, 实现任意脉冲波形的产生^[8]. 液晶空间光调制器是其中的一种关键器件.

1.1 液晶空间光调制器

液晶调制器由在空间上排列成一维或二维的独立单元组成, 每个单元可以独立地接收电信号, 其最小单元称为像素. SLM 像素由互相绝缘的行电极和列电极组成^[9]. 外加电场下, 液晶分子发生扭曲, 液晶调制器的透过率发生改变, 因此, SLM 可以看成是一个复振幅透射率受写入信号, 即受调制信号控制的滤光片. 写入信号可通过 PC 端口传递到相应像素上改变光透过率, 实现对入射光场强度和相位的调制. 实际应用中, LC-SLM 由中间的两个液晶片及前后各一个偏振片组成, 如图1. 入射光经过起偏器成为水平偏振光, A、B

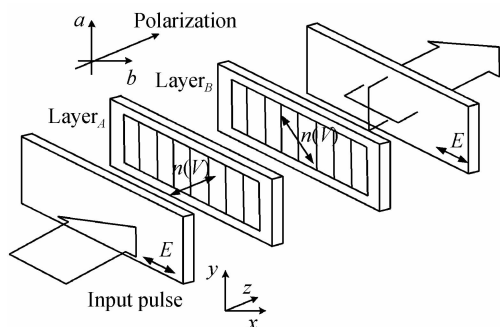


图1 液晶调制器的调制原理

Fig. 1 Schematic diagram of liquid crystal spatial light modulator

两个液晶片的分子方向即液晶轴方向互相正交, 且与输入光的偏振方向相差 45° , 调制器输出端的检偏器输出水平偏振光. 液晶片厚度 d 及输入光波长 λ , 对于第 j 个像素点, 非寻常光(e光)和寻常光(o光)间传输相位变化差 $\Delta\phi_j$ 导致的偏振态变化取决于加载于该像素点的调制电压 $V^{[10]}$, 即

$$\Delta\phi_j = 2\pi\Delta n(V_j)d/\lambda \quad (1)$$

式中, $\Delta n(V_j)$ 表示随调制电压变化的液晶像素折射率. 图1中, 输入光的偏振态旋转至水平方向后通过液晶片 A, 相位变化 $\Delta\Phi^A$, 输入光的偏振态向晶体轴 a 方向旋转. 通过液晶片 B 后产生了与电压相关的相位变化, 表示为 $\Delta\Phi^B$, 相应地其偏振态向 b 方向旋转. 因此, 输入光在两个垂直方向上的相位变化相互补偿, 其偏振方向相应旋转. 输出光的相位变化由平均相位变化差 $[\Delta\Phi^A + \Delta\Phi^B]/2$ 决定, 而其振幅根据相位变化差 $\Delta\Phi^A - \Delta\Phi^B$ 的余弦变化.

通过两个液晶片之后, 第 n 个像素点对应的输出电场为

$$E_n^{\text{output}} = E_n^{\text{input}} \cos((\Delta\Phi^A - \Delta\Phi^B)/2) e^{i(\Delta\Phi^A + \Delta\Phi^B)/2} = E_n^{\text{input}} R_n \quad (2)$$

传递函数 $R_n = e^{i\varphi(\omega)} \sqrt{T_n(\omega)}$ 表示第 n 个像素滤波方程. 可见, $\cos((\Delta\Phi^A - \Delta\Phi^B)/2)$ 实现强度调制, $e^{i(\Delta\Phi^A + \Delta\Phi^B)/2}$ 实现相位调制. $T_n(\omega)$ 和 $\varphi(\omega)$ 分别表示各像素输出强度和相位; 当 $\varphi(\omega) = 0$ 时, SLM 实现纯强度调制, 当 $T_n(\omega) = 1$ 时, 实现纯相位调制, 而两个液晶阵列不能单独实现纯相位或幅度调制, 但二者的组合可以^[11].

1.2 系统模型

基于傅里叶变换, 利用 SLM, 搭建反射式脉冲整形系统, 如图2. 在光栅与调制器之间放入一个光学透镜, 入射光信号经一个光环行器输入(2端口)并准直到望远镜系统放大后投射到光栅上, 光栅将入射光衍射分离出不同的波长分量. 之后经过透镜汇聚到 SLM, 此时透镜起傅里叶变换作用, 即将输入的时域光信号变换为具有一定频率间隔的不同频谱分量, 这些分量经过 SLM 调制, 经反射镜从原光路返回, 此时透

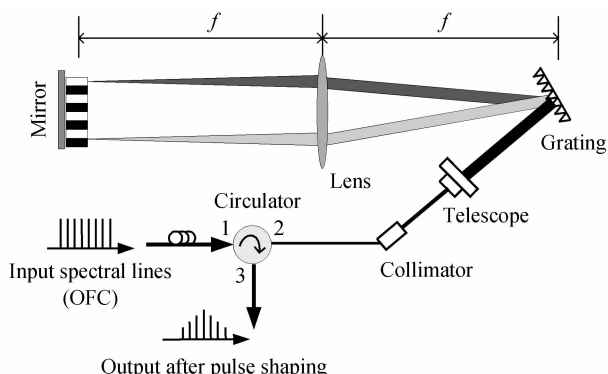


图2 脉冲整形系统实验装置

Fig. 2 Experimental setup of pulse shaping system

镜实现傅里叶反变换,将反射的光信号从频域变回到时域.最后,经过光栅后各频率分量又合成一束光束,从光环行器输出端(3端口)输出调制后的各种期望波形^[12].

整个系统在 PC 端口控制下实现的,由计算机通过串口改变 SLM 每个像素点的调制电压,其赋值大小由期望输出信号波形的幅频、相频决定.

1.3 系统参量计算

系统采用的 LC-SLM 为 CRI 公司的 128-D-NM 型产品,适用光谱范围为 900~1 620 nm,各晶片有 128 个像素点,相邻像素点间隔为 100 μm ,所用光栅为 1 100 lines/mm,故光栅常量为 1/1 100,消色差透镜焦距为 750 mm,实验中要求系统分辨率为 10 GHz,即 0.08 nm,则需要处理的信号谱宽为 $0.08 \times 128 = 10.24$ nm,根据色散方程

$$\frac{\delta\lambda}{\delta x} = \frac{d \cos \theta_d}{f} = \frac{10.24 \text{ nm}}{12.8 \text{ mm}} \quad (3)$$

得到光栅的衍射角 $\theta_d = 48.7^\circ$.

系统采用的光信号中心波长为 1 550 nm,再根据光栅方程

$$\lambda = d(\sin \theta_i + \sin \theta_d) \quad (4)$$

得到光栅入射角 $\theta_i = 72.5^\circ$.

利用上述参量,实现系统搭建,在初步完成后,对系统色散进行测量:给系统输入短脉冲,在输出端利用自相关仪测量输出脉冲宽度,不断调节光栅位置,当测得的光脉冲宽度与输入脉冲宽度相等时,系统色散最小,可近似为 0,这样,可不考虑色散对系统的影响.

2 LC-SLM 校准

首先需对 LC-SLM 两个液晶片的像素点进行校准,以获得入射光经过每个像素点后的透射光强及相位变化与调制电压的对应关系.

2.1 校准原理及方法

通过改变加载到 LC-SLM 各像素点的调制电压实现对输入光各频率分量的强度及相位调制.像素校准,就是要计算出完整周期内 $U-\Phi$ 的关系,得出产生不同相移所需的调制电压.

实验中,LC-SLM 像素点可施加的最大电压为 10 V,用 12 bit 表示.校准时,首先将两个调制晶片其中之一,如 layer_A 每个像素点的调制电压赋最大值 (4 095),对 layer_B 像素点的调制电压从 0 到最大值 (4 095) 赋值,得到 layer_B 的调制电压与输出信号强度的对应关系;接下来将两个调制晶片交换赋值利用同样方法得到 layer_A 的调制电压与输出信号强度的对应关系.设两个调制晶片产生的相位变化分别为 Φ^A 和 Φ^B ,由式(2)得出光强透射率 T 与相位 φ 关系

$$T = \cos^2 \left(\frac{\Phi^A - \Phi^B}{2} \right), \varphi = \frac{\Phi^A + \Phi^B}{2} \quad (5)$$

计算得

$$\Phi^A = \varphi + \arccos \sqrt{T_A(U_A)} \quad (6)$$

$$\Phi^B = \varphi - \arccos \sqrt{T_B(U_B)} \quad (7)$$

利用实验测到的 T 及式(6)和(7),可计算出相位变化与外加调制电压的关系.

2.2 实验结果

LC-SLM 像素校准采用波长为 1 550 nm 的连续激光,实验测得调制器每个晶片的输出光透过率 (T) 与调制电压 (U) 的关系,如图 3.

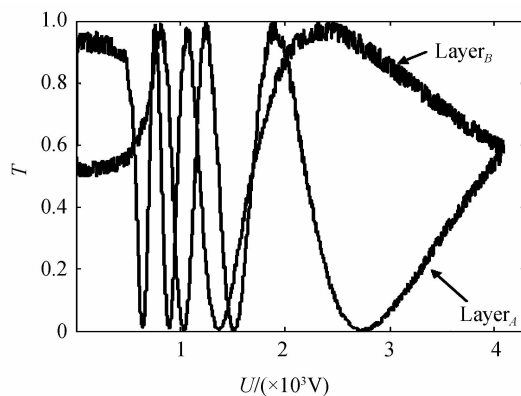


图 3 layer_A 及 layer_B 输出光强的透过率与调制电压的关系
Fig. 3 Relationship between light intensity and modulation voltage for layer_A and layer_B

当 SLM 调制电压递增时,输出光的透过率呈周期性变化,这是由于透过率取决于外加电压作用下液晶分子的相位变化,如式(1),若液晶分子的折射率随外加电压单调线性变化,则输出光信号的透射率随调制电压的增加呈周期性变化,且周期恒定.由于液晶分子折射率随外加电压的增加不是单调线性增大的,因此,图 3 中周期不恒定.

以两个液晶调制晶片产生 $0 \sim 2\pi$ 的相位变化为例,通过计算透过率得到输出光相位变化与调制电压的关系,其余周期可加减 π 的整数倍计算得到.

对于 Layer_A ,在 $0 \sim \pi$ 范围,由式(6)、(7),可得 $\Delta\Phi^A - V_A$ 的关系为: $\Delta\Phi^A = [2\arccos(\sqrt{T_A(U_A)}) + \Delta\Phi_{4095}^B, \Delta\Phi_{4095}^B$ 未知,可任意取一个数值,为了方便计算,这里取 $\Delta\Phi_{4095}^B = 0$;同样,在 $\pi \sim 2\pi$ 范围内, $\Delta\Phi^A - U_A$ 的关系为: $\Delta\Phi^A = [2\pi - 2\arccos(\sqrt{T_A(U_A)})] + \Delta\Phi_{4095}^B, \Delta\Phi_{4095}^B$ 同样取 0 值.

对于 Layer_B ,在 $0 \sim \pi$ 范围, $\Delta\Phi^B - U_B$ 的关系为: $\Delta\Phi^B = 2\arccos(\sqrt{T_B(U_B)}) + (\Delta\Phi_{4095}^A - 2\pi)$, $\Delta\Phi_{4095}^A$ 取值为 Layer_A 在 $0 \sim \pi$ 范围内计算所得结果;在 $\pi \sim 2\pi$ 范围内, $\Delta\Phi^B - U_B$ 的关系为: $\Delta\Phi^B = [2\pi - 2\arccos(\sqrt{T_B(U_B)})] + (\Delta\Phi_{4095}^A - 2\pi)$,其中, $\Delta\Phi_{4095}^A$ 取值为 Layer_A 在 $\pi \sim 2\pi$ 范围内计算所得结果.

经过 SLM 后输出光的相位变化与调制电压的对应关系 $\Phi^A - U_A$ 及 $\Phi^B - U_B$,如图 4.

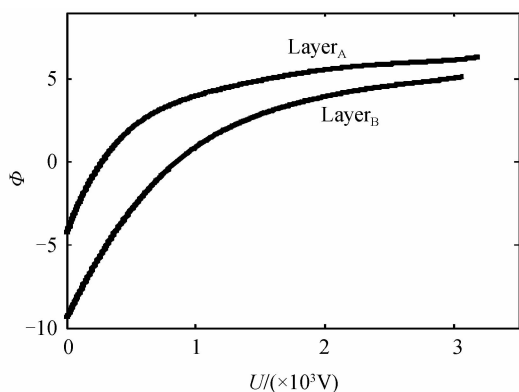
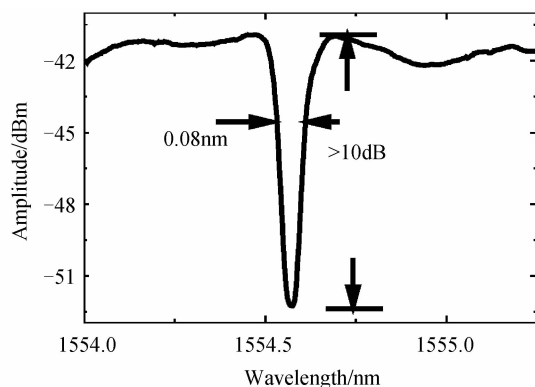
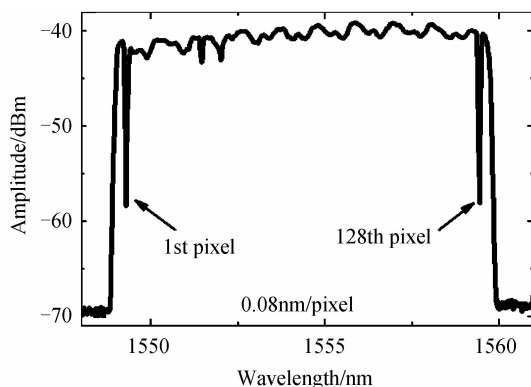


图4 layer_A及layer_B输出光的相位变化与调制电压的关系
Fig. 4 Relationship between phase variation and modulation voltage for layer_A and layer_B



(a) Spectrum of single pixel is off



(b) Spectrum of starting pixel is off

图5 系统分辨率测试结果

Fig. 5 Experimental results for system resolution

3.2 光谱整形应用

实验采用的信号源为基于电光调制技术产生的频率间隔为 10 GHz 的光学频率梳信号,即由一个强度调制器与一个相位调制器级联产生,其中两调制器的驱动信号均为 10 GHz 的射频信号.输入 LC-SLM 的光学频率梳信号的谱分布如图 6,其不同谱分量之间的间隔为 10 GHz.

光谱整形前,需获得光学频率梳信号的不同频率分量与不同像素点位置之间的关系.为此,将某一像素点赋值为使透过率为 1 的电压,其余像素点均赋值为使透过率为 0 的调制电压.由此,通过对比输入输出光谱,到不同频率分量(或波长)与不同像素点的对应关系.在此基础上,根据应用需要,通过改变每个像素点的调制电压,可实现光谱整形.实验中,分别产生了平坦、高斯、三角以及倒三角形的光谱形状,如图 7.

对输入光学频率梳的每条谱线分别进行调制,使

因此,将得到的 LC-SLM 输出光强透过率及相位与输入调制电压的关系应用到本系统,以光学频率梳为输入信号源,实现时域任意脉冲波形的产生.

3 系统应用

3.1 系统分辨率测试

测得系统实验光路损耗为 6 dB,包括光纤环形器 1.3 dB 损耗和 SLM 1.3 dB 损耗,其余大部分损耗来自大的入射光斑直径及光栅.利用放大的自发辐射 (Amplified Spontaneous Emission, ASE) 光源对该系统进行分辨率测试,检测的光谱仪分辨率为 0.01 nm,其结果如图 5,可以看出,系统的分辨率为 0.08 nm,即 10 GHz.

输出只分别保留间隔为 10 GHz 和 20 GHz 的 3 条谱线分量,用光示波器观察输出的时域波形,如图 8,此时可分别得到周期 100 ps 和 50 ps 的正弦波.

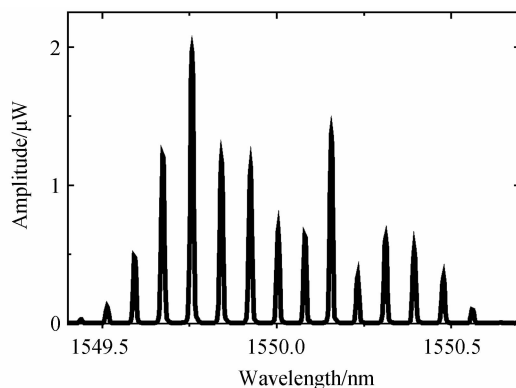


图6 输入的光学频率梳信号

Fig. 6 Spectrum of input optical frequency comb

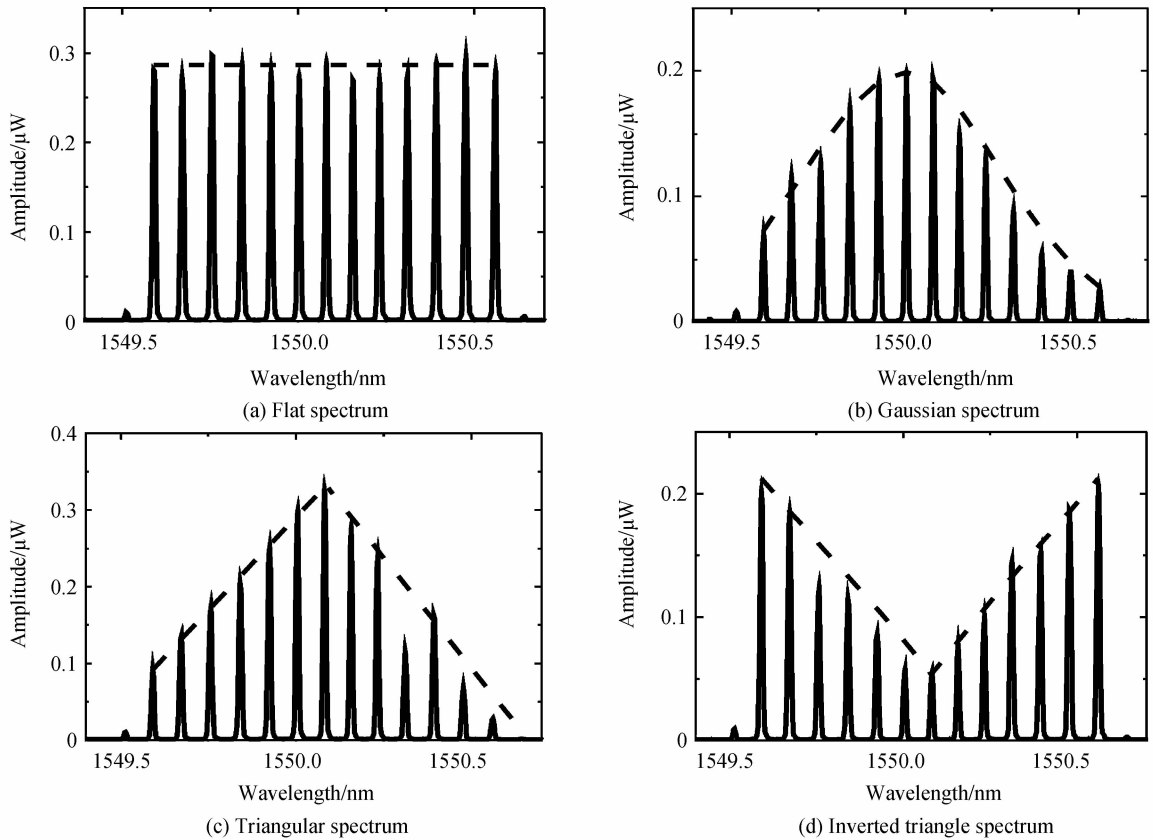


图 7 光谱整形实验输出的平坦光谱

Fig. 7 Experimental results of spectrum shaping

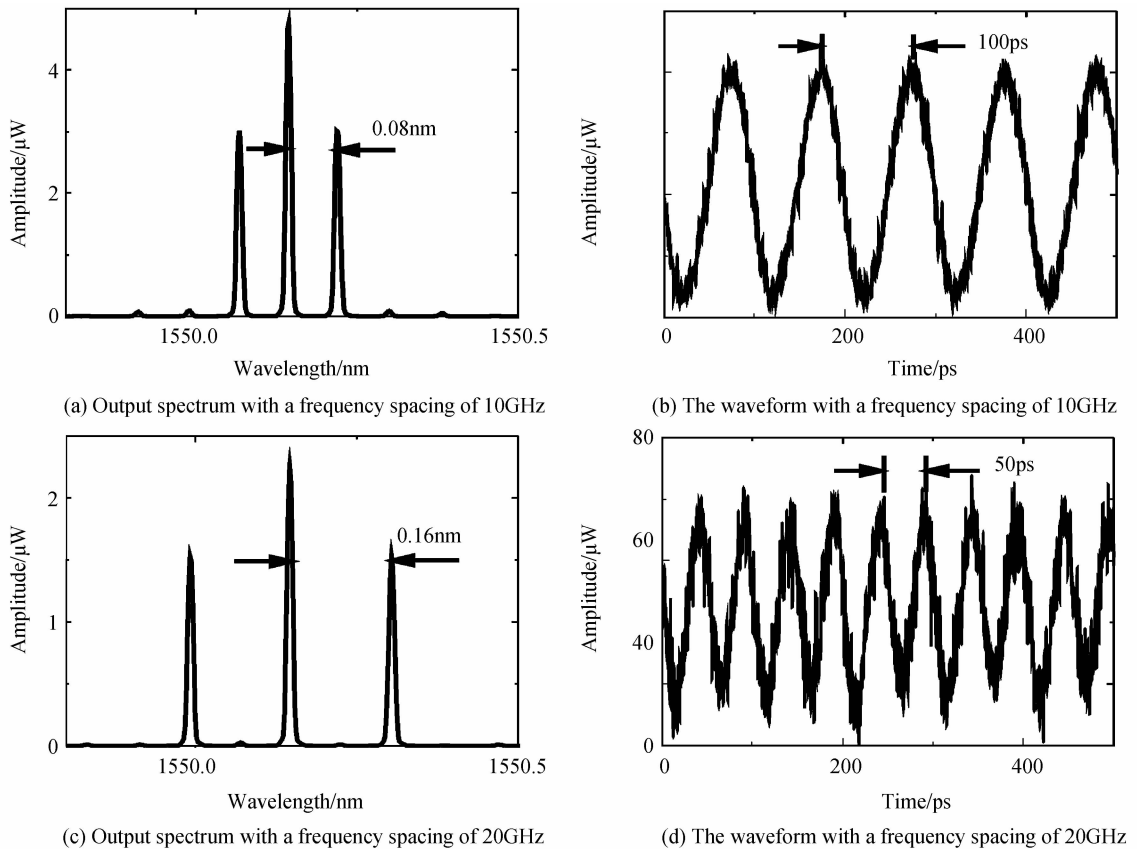


图 8 时域演示

Fig. 8 Demo of waveform

为得到任意的时域波形输出,对光学频率梳的每条谱线分别进行调制,当输出谱如图 9(a)时,对应的时域波形如图 9(b).作为比较,图 9(b)也给出了此时的理论输出波形.由图可见,实验数据和理论结果基本一致,本脉冲整形系统能够实现光信号的全光频域变换.

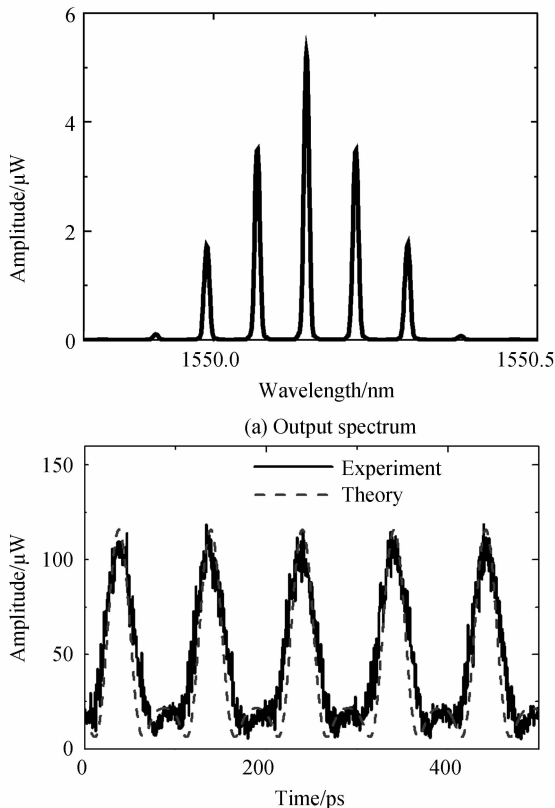


图 9 一种任意调制的输出谱及相应的时域波形
Fig. 9 Output spectrum and the corresponding waveform with arbitrary modulation

需要指出的是,作为功能验证性实验,实验中只对输入的 13 条光频梳谱线进行了调制.在未来工作中,通过增大光频梳发生器中相位调制器的调制深度或采用光学非线性方法进行光谱拓展,可得到 128 条甚至更多的可利用谱线,由此,采取本方法可产生更复杂的时域波形.

4 结论

将输入的光信号从时域变换到频域,利用 LC-SLM 实现频域内的强度及相位调制,改变光信号的输出特征从而实现脉冲整形.搭建了反射式脉冲整形系统,完成了对液晶空间光调制器输出强度和相位变化与调制电压间关系的校准,利用校准结果实现了光谱

整形,并产生了几种脉冲波形.为应用此系统实现复杂任意脉冲波形的产生奠定了基础.

参考文献

- [1] YANG Zhen-feng, YANG Zhen-jun, ZHANG Shu-min. Comparison of two kinds of pulse width of ultrashort hyperbolic secant pulses[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(9): 1722.
杨振峰,杨振军,张书敏.超短双曲正割脉冲的两种脉冲宽度比较[J].光子学报,2008,**37**(9):1722.
- [2] WEINER A M. Femtosecond optical pulse shaping and processing[J]. *Progress in Quantum Electronics*, 1995, **19**: 161-237.
- [3] YU Ben-li, MAO Hong-min. A review of optical ultrashort shaping[J]. *Journal of Anhui university*, 2005, **29**(2): 45-48.
俞本立,毛红敏.光学超短脉冲整形的研究进展[J].安徽大学学报,2005,**29**(2):45-48.
- [4] LI Dong, LIU Bai-yu. Electrical pulse-shaping system on the high power laser system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(2): 1304.
李东,刘百玉.用于高功率激光装置中的电脉冲整形系统[J].光子学报,2005,**34**(2):1304.
- [5] WEINER A M, HERITAGE J P, KIRSCHNER E M. High-resolution femtosecond pulse shaping [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 1988, **5**: 1563-1571.
- [6] ZOU Hua, ZHOU Chang-he. Femtosecond pulse shaping with space-time conversion technique [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2005, **42**(2): 2-4.
邹华,周常河.飞秒脉冲时空变换整形技术[J].激光与光电子学进展,2005,**42**(2):2-4.
- [7] CHEN Huai-xin, SUI Zhan, CHAN Zhen-pei, et al. Laser beam shaping using liquid crystal spatial light modulator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(9): 1108-1109.
陈怀新,隋展,陈祯培,等.采用液晶空间光调制器进行激光光束的空间整形[J].光学学报,2001,**21**(9):1108-1109.
- [8] ANDREW M W. Femtosecond pulse shaping using spatial light modulators [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2000, **71**(5): 1930-1932.
- [9] HAN Jun, ZHENG Ting, NIE Liang, et al. Optimization method of reconstruct wavefront based on spatial light modulator[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(9): 1414.
韩军,郑婷,聂亮,等.基于空间光调制器的波面重建优化方法研究[J].光子学报,2011,**40**(9):1414.
- [10] WEINER A M. Spectral Line-by-Line Pulse shaping on an optical frequency comb generator [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2007, **43**(12): 1165-1167.
- [11] WEINER A M, LEAIRD D E, PATEL J S, et al. Programmable shaping of femtosecond optical pulses by use of 128-element liquid crystal phase modulator [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2009, **28**(4): 909-914.
- [12] JIANG Zhi, LEAIRD D E, WEINER A M. Optical arbitrary waveform generation and characterization using spectral line-by-line control [J]. *Journal of Light Wave Technology*, 2006, **24**(7): 2488-2489.