

# 增大基于电光相位调制的时间透镜孔径的参数调制法

常 硕 娄淑琴 李 博 韩柏琳

(北京交通大学电子信息工程学院, 北京 100044)

**摘要** 提出了一种用于增大基于电光相位调制时间透镜孔径的参数调制法, 理论推导出该方法的实现原理, 并结合时间透镜在光脉冲压缩中的应用, 研究了调制参数  $Q$  对时间孔径和脉冲压缩效果的影响。结果表明, 对于文中调制频率为 20 GHz, 理想压缩系数为 5 的时间成像系统, 采用这种方法可将仅占调制周期 15.6% 的时间孔径提高到 50% 以上, 并将脉冲压缩系数由 3.11 提升到 4.46。同时, 通过选取相反的输入和输出段色散, 还可有效降低时间系统的调制电压。研究结果表明, 该参数调制法只需对时间透镜本身参数做调整, 无需引入新器件, 便可有效地增大时间透镜的孔径, 提高脉冲压缩系数, 使其更接近理想值。该研究成果为电光相位调制时间透镜系统的性能提升提供了一种简洁而有效的手段。

**关键词** 信号处理; 时间透镜; 电光相位调制; 孔径效应; 光脉冲压缩

**中图分类号** TN29 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0906003

## Parameter Modulation to Method Expand Aperture of Time Lens Based on Electro-Optical Phase Modulation

Chang Shuo Lou Shuqin Li Bo Han Bolin

(School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract** A parameter modulation method is proposed to increase the aperture of time lens implemented by electro-optic phase modulation. The implementing principle of this method is theoretically deduced. The effects of modulation parameter  $Q$  on the aperture of time lens and pulse compression ratio are discussed for the application of optical pulse compression with time lens. Numerical results illustrate that the proposed method can extend the aperture from 15.6% to more than 50% of whole modulation period and increase the compression ratio from 3.11 to 4.46 for the temporal imaging system with ideal compression ratio of 5 at the modulation frequency of 20 GHz. Besides, modulation voltage in high-frequency temporal imaging system can be reduced by selecting input and output fiber with opposite second order dispersion. The parameter modulation method can effectively improve the aperture of time lens implemented by electro-optic phase modulation and optical pulse compression ratio in temporal imaging system by only adjusting the modulation voltage of electro-optic phase modulation without other components. This method can offer a simple and effective way to improve the performance of time lens based on electro-optic phase modulation.

**Key words** signal processing; time lens; electro-optical phase modulation; aperture effect; optical pulse compression

**OCIS codes** 060.5060; 070.1170; 110.6915; 070.7145; 320.5520

## 1 引 言

自 1989 年 Kolner 等<sup>[1]</sup>首次提出“时间透镜”以来, 时间透镜的应用已深入到光脉冲压缩<sup>[2]</sup>与放

大<sup>[3]</sup>、光通信网络<sup>[4-5]</sup>、光信号检测<sup>[6-7]</sup>与处理<sup>[8]</sup>等诸多领域, 并为超快光通信开辟了新的发展方向<sup>[9]</sup>。通常, 时间成像系统由输入色散、时间透镜和输出色

**收稿日期**: 2014-03-13; **收到修改稿日期**: 2014-05-16

**作者简介**: 常 硕(1987—), 男, 硕士研究生, 主要从事光纤通信方面的研究。E-mail: changshuo0627@163.com

**导师简介**: 娄淑琴(1965—), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事光纤通信、全光网络关键技术、特种光纤及器件、光纤传感等方面的研究。E-mail: shqlou@bjtu.edu.cn(通信联系人)

散组成,而时间透镜作为时间成像系统的关键组成部分,直接制约着系统性能的优劣。因此,研究高性能的时间透镜对提升时间成像系统的性能具有重要的意义。

目前,实现时间透镜的方法主要有四种,分别是基于电光相位调制<sup>[10]</sup>、基于非线性晶体中和频与差频<sup>[11]</sup>、基于非线性光纤中交叉相位调制(XPM)<sup>[12]</sup>以及四波混频(FWM)<sup>[13]</sup>。在这些方法中,基于电光相位调制的时间透镜实现方法最为简单、稳定性好且参数调整灵活,因此,大部分实验都是使用这种方法。理想的时间透镜是对时间进行完美的二次相位调制。然而,在实际应用中,电光相位调制器通常使用余弦信号来近似替代二次相位调制,这样只能在调制中心附近实现近似的二次相位调制<sup>[14]</sup>,从而导致时间透镜受到孔径限制。尤其在光脉冲压缩中,孔径效应的存在直接限制了压缩脉冲的宽度以及系统速率。因此,改善孔径对提高基于电光相位调制的时间透镜的性能至关重要。2001年,Yurchenko等<sup>[15]</sup>提出时间透镜相差理论,并利用高阶色散与透镜高阶项的相互抵消来优化孔径。但是,由于高阶项之间的相互补偿需要严格的条件,实现起来较为困难。2004年,Howe等<sup>[16]</sup>使用两个电光相位调制器作为时间透镜,其中,第二个相位调制器用作补偿镜,实现了对电光相位时间透镜孔径的优化。然而,使用两个相位调制器相互补偿,系统相对复杂,且稳定性不佳。2010年,Munioz-Camuniez等<sup>[17]</sup>提出一种单相位调制器的多级电压调控方案,

该方法可以将孔径展宽到调制周期的一半以上,甚至更多。但是,这需要至少三级电信号的协调同步,同时各级之间的参数选择也不易协调,实现起来较为复杂。这些研究工作可以在一定程度上提高电光相位调制时间透镜的孔径,但均存在实验系统和参数选择较为复杂的问题。

为了简单而有效地改善基于电光相位调制时间透镜的孔径,本文提出了一种参数调制法,通过调制相位调制器的驱动电压来增大时间透镜的孔径。理论推导出参数调制法提高时间孔径的实现原理,通过数值模拟,研究了调制参数的选择对孔径的影响,并结合时间透镜在光脉冲压缩中的应用,验证了参数调制法对时间透镜的孔径的改进效果。为了进一步降低调制电压幅度,在系统中引入色散补偿机制,实现了提高时间透镜孔径的同时有效控制调制电压的目的。本文提出的参数调制法仅需对电光相位调制时间透镜本身参数做调整,无需引入新器件,即可将时间孔径的调制周期由15.6%提高到50%以上。该研究成果为进一步优化基于电光相位调制的时间透镜系统的性能提供了一种简洁而有效的手段。

## 2 参数调制法

图1为典型的时间透镜成像系统,它通常由输入色散模块、时间透镜和输出色散模块三部分组成<sup>[1]</sup>。这里将参考系定位于时间脉冲的中心<sup>[10]</sup>,以便于计算。

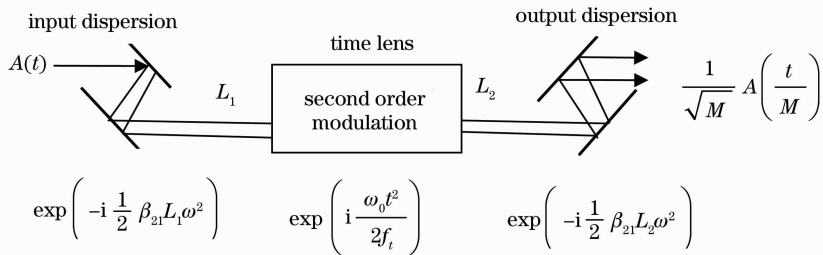


图1 时间成像系统结构

Fig. 1 Construction of temporal imaging system

图中  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $\beta_{21}$ 、 $\beta_{22}$  分别为输入段及输出段光纤的长度和二阶色散,  $t$  是以输入脉冲中心为参考系原点下的时间变量,  $\omega$  为输入光频率,  $\omega_0$  为输入光脉冲的中心频率,  $A(t)$  为输入光脉冲包络,  $f_t$  为时间透镜的焦距,  $M$  为放大系数, 可以表示为

$$M = -\frac{\beta_{22}L_2}{\beta_{21}L_1}. \quad (1)$$

对于任意慢变包络为  $A(0, t)$  的输入窄带光脉冲, 当

它满足如下成像条件:

$$\frac{1}{\beta_{21}L_1} + \frac{1}{\beta_{22}L_2} = -\frac{\omega_0}{f_t}, \quad (2)$$

该系统输出脉冲包络为

$$A(L_1 + L_2, t) = \frac{1}{\sqrt{M}} \exp\left(\frac{i\omega_0 t^2}{2Mf_t}\right) A\left(0, \frac{t}{M}\right). \quad (3)$$

由(3)式可以看出, 只要调节输入、输出段的色散量, 即光纤的二阶色散或长度, 便可以控制时间成像系

统的放大系数,从而实现脉冲进行展宽或者压缩处理。

理想时间透镜的相位调制函数为

$$\varphi_{\text{ideal}}(t) = \frac{\omega_0}{2f_t} t^2, \quad (4)$$

它是对时间的二次相位调制。然而实际的光电相位调制器,通常采用余弦信号来驱动。当采用的余弦信号为  $V_0 \cos(\omega_m t)$  时,光电相位调制器产生的相位调制函数为

$$\varphi_{\text{eo}}(t) = \frac{\pi}{V_\pi} \cdot V_0 \cos(\omega_m t), \quad (5)$$

式中  $V_\pi$  为光电相位调制器的半波电压,  $\omega_m$  为调制频率。在调制中心附近对(5)式中的  $t$  进行泰勒级数展开,忽略四次以上的无穷小项。然后与(4)式联立,根据两式二次项系数的相互对应,可得到实现时间透镜时光电相位调制器所需的调制电压幅值:

$$V_0 = \frac{V_\pi}{\pi\omega_m^2} \left( \frac{1}{\beta_{21}L_1} + \frac{1}{\beta_{22}L_2} \right) = \frac{V_\pi D}{\pi\omega_m^2}, \quad (6)$$

式中  $D$  由成像条件(2)式引入,为时间系统中前后两段色散量的倒数和,即

$$D = \frac{1}{\beta_{21}L_1} + \frac{1}{\beta_{22}L_2}. \quad (7)$$

将(6)式电压值代入(5)式的泰勒展开式中,由于展开式中的常数项与时间无关,对时间透镜没有任何影响,这里可以不加考虑。光电相位调制器产生的相位调制函数变为

$$\varphi_{\text{eo}}(t) = \frac{D}{\omega_m^2} \cdot \left( -\frac{\omega_m^2 t^2}{2} + \frac{\omega_m^4 t^4}{24} \right) = -\frac{D}{2} t^2 + \frac{D\omega_m^2}{24} t^4. \quad (8)$$

显然,(8)式中的第一项是系统需要的理想二次相位调制;第二项可以看作干扰项,也就是以余弦电压提供的相位调制代替理想二次相位调制时所产生的偏差。当调制脉冲在调制中心附近时,四次项可以忽略,余弦相位调制可近似为理想的二次相位调制,与(4)式相同。然而,当调制脉冲离调制中心越远,四次项的影响越大,偏离理想的二次相位调制越严重。可见,余弦中的高次项是导致余弦调制偏离二次相位调制的主要因素。通常将光电相位调制器中余弦驱动电压所提供的相位调制与二次相位调制偏离不超过 2% 的区域,定义为电光时间透镜的孔径<sup>[10]</sup>。取(8)式与理想情况的差值小于 2% 来计算,即

$$\left| \frac{\varphi_{\text{eo}}(t) - \varphi_{\text{ideal}}(t)}{\varphi_{\text{ideal}}(t)} \right| = \left| \frac{\frac{D\omega_m^2}{24} t^4}{-\frac{D}{2} t^2} \right| \leq 2\%, \quad (9)$$

可得到相对时间透镜的孔径为

$$|\omega_m t| \leq \sqrt{0.24} = 0.49, \quad (10)$$

观察(10)式易知,时间孔径只与频率有关。因此,时间透镜的孔径大小  $t_A$  与其调制周期  $T_m$  的比例为恒定值,即

$$\frac{t_A}{T_m} = 2 \cdot \left| \frac{0.49}{2\pi} \right| = 15.6\%. \quad (11)$$

可见,对于基于电光相位调制的时间透镜,其孔径仅为调制周期的 15.6%。例如调制频率为 20 GHz 时,  $t_A = \pm 3.9$  ps,即只有在调制中心附近 3.9 ps 范围内存在理想的时间透镜效应。若脉冲宽度超出该范围,时间透镜将不能对其进行完美调制,导致输出信号整体发生偏离,出现压缩或展宽系数降低以及旁瓣等现象。

通过分析余弦电压产生的相位调制与理想二次相位调制的偏离可以看出,其中四次项涵盖了其绝大部分偏离。因此,若能改变系统参数,消除四次项的影响,便可更加接近理想的二次相位调制,从而有效扩大时间孔径。由此,若是在余弦驱动电压幅值中引入参数因子  $Q$ ,对调制电压进行修正,使得

$$V = (1 + Q) \cdot \frac{V_\pi D}{\pi\omega_m^2} \cos(\omega_m t), \quad (12)$$

则(8)式变为

$$\varphi_{\text{eo}}(t) = \frac{(1 + Q)D}{\omega_m^2} \cdot \left( -\frac{\omega_m^2 t^2}{2} + \frac{\omega_m^4 t^4}{24} \right) - \frac{D}{2} t^2 - \frac{QD}{2} t^2 + \frac{(1 + Q)D\omega_m^2}{24} t^4. \quad (13)$$

若能找到一个最合理的  $Q$  值,使得(13)式中二、三两项相抵消,即

$$\frac{QD}{2} t^2 = \frac{(1 + Q)D\omega_m^2}{24} t^4, \quad (14)$$

便可得到理想的二次相位调制。总之,通过引入一个  $Q$  参数,对调制电压幅度进行调制,可得到一个更为理想的二次相位调制,从而改善时间透镜的孔径。因此,将该方法称为  $Q$  参数调制法。

### 3 数值模拟和讨论

#### 3.1 $Q$ 参数的取值分析

引入  $Q$  参数后,将(13)式代入(9)式,可得到引入参数调制后相对时间透镜的孔径为

$$|\omega_m t| \leq \sqrt{12 \left( \frac{Q + 0.02}{Q + 1} \right)}. \quad (15)$$

改变  $Q$  值,由(15)式可以得到相对时间透镜的孔径变化情况,如图 2 所示。可以看出,随着  $Q$  值增加,孔径将随之增大。当  $Q = 0$  时,相对孔径大小为 0.49,与(10)式结果一致。当  $Q$  值增加时,相对孔

径随之被扩展,也就是说,增大  $Q$  参数将有助于扩展相对孔径。

然而,系统所需的用于抵消高次项的  $Q$  值并不能无限增大,它由系统自身参数决定。由(14)式可得

$$Q = \frac{\omega_m^2 t^2}{12 - \omega_m^2 t^2} \quad (16)$$

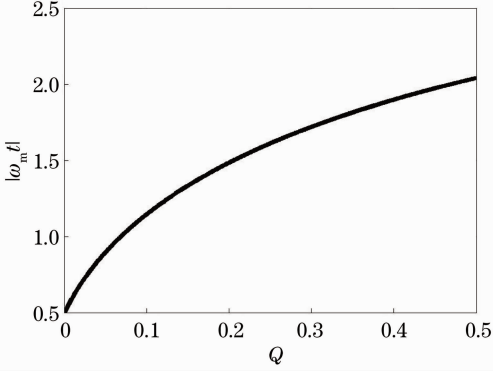


图 2 相对时间孔径随调制参数  $Q$  的变化关系  
Fig. 2 Relationship between relative aperture of time lens and value of parameter  $Q$

可见,系统所需的  $Q$  值与调制频率和脉冲时间有关,图 3 给出不同调制频率下系统所需  $Q$  值随脉冲时间  $t$  的变化情况。对比几条曲线可知, $Q$  值随调制频率的增大而增大。例如,对于脉冲上  $t = 4$  ps 的点,调制频率为 20 GHz 时抵消高次项所需的  $Q$  值为 0.051;而调制频率上升到 40 GHz 时, $Q$  值为 0.274,增加了 5.37 倍。可见, $Q$  值随频率的增加十分明显。此外,单看每条曲线可知,距离调制区中心越远,抵消高次项所需的  $Q$  值越大。也就是说,对于一个输入光脉冲,无法找到一个固定的  $Q$  值,使脉冲时间上的每一个点都恰好满足(14)式,使人工引入的二次项与造成孔径的四次项完全抵消,而只能找到一个最合理的  $Q$  值,使得时间透镜的整体效果

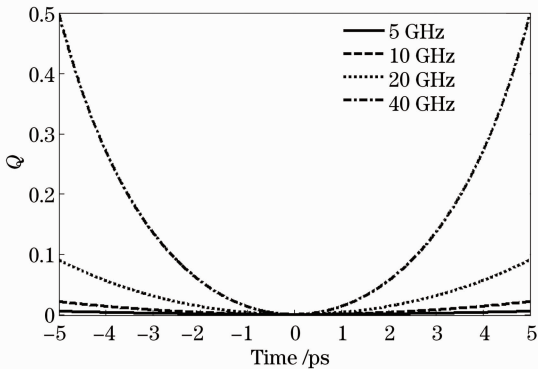


图 3  $Q$  值随脉冲时间和调制频率的变化关系  
Fig. 3 Relationship between value of parameter  $Q$  and time of the pulse or the modulation frequency

达到最好,称此时的  $Q$  值为该系统下的最佳  $Q$  值。

### 3.2 最佳 $Q$ 值及系统特性分析

最佳  $Q$  值的选取,可以采用离散均方差的方法<sup>[17]</sup>,也可以采用对实际系统的仿真来决定。使用图 1 所示的时间系统进行仿真来确定最佳  $Q$  值,其中,时间透镜由电光相位调制器实现。选取输入光脉冲为高斯型,波长为 1550 nm,半峰全宽(FWHM)为 5 ps,峰值功率为 1 mW。电光晶体的半波电压为  $V_\pi$ ,调制频率为 20 GHz,可得到其孔径仅有 7.8 ps。输入输出光纤的长度和二阶色散分别为 1 km、0.2 km 和  $-20 \text{ ps}^2/\text{km}$ 、 $20 \text{ ps}^2/\text{km}$ ,理论上可以实现压缩系数为 5 倍的脉冲压缩效果。这里对于色散的选取使用了色散补偿机制,目的是降低电光相位调制器所需的调制电压,下文 3.3 节将具体讨论。该系统下,理想的时间透镜可将峰值功率提升到 5 mW,将 FWHM 压缩至 1 ps,但由于实际的电光相位调制时间透镜存在孔径效应,难以达到理想的脉冲压缩。

图 4 为该实验系统输出光脉冲的峰值功率和 FWHM 随  $Q$  取值变化的仿真结果, $Q=0$  点可理解为未经过  $Q$  参数调制时系统的输出结果,可用于比较。观察该图可知,输出光脉冲的峰值功率随  $Q$  参数的取值先升后降,而 FWHM 与之相反,先降后升。说明在一定范围内,参数调制法可以对电光时间透镜起到改善效果,使其孔径增大,提高光脉冲的压缩效果。图中用突出圆点分别标出了输出光脉冲的最大峰值功率和最小 FWHM 所在点。最大峰值功率对应的  $Q$  值为 0.25,最小 FWHM 对应的  $Q$  值为 0.36。尽管这两点的  $Q$  值有所不同,但输出光脉冲宽度在两  $Q$  值之间区域内变化较为平缓,且  $Q$  值越大,输出脉冲旁瓣越大,因此,可取 0.25 为该系

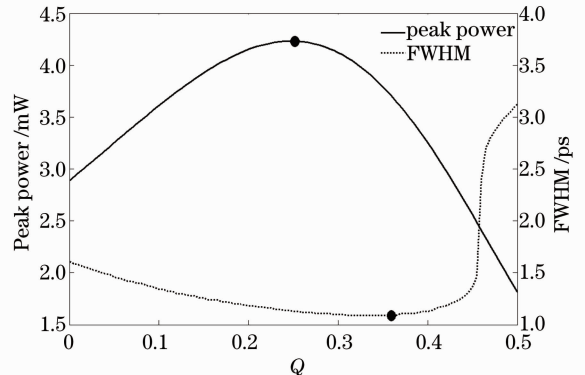


图 4 输出光脉冲宽度和峰值功率随  $Q$  值的变化关系  
Fig. 4 Peak power and FWHM of the output optical pulse along with modulation parameter  $Q$

下的最佳  $Q$  值。

图 5 为  $Q=0.25$  的情况下,实验系统的时间孔径变化情况。从图中可以看出,未采用参数调制法,仅采用普通余弦调制时,时间透镜的孔径为  $7.8 \text{ ps}$ ,占调制周期的  $15.6\%$ 。而引入  $Q$  参数调制后,在  $Q=0.25$  时,时间透镜的孔径值提高到  $26.8 \text{ ps}$ ,相比普通余弦调制的情况,其时间孔径已达到整体调制周期的  $53.6\%$ ,提升相当明显。

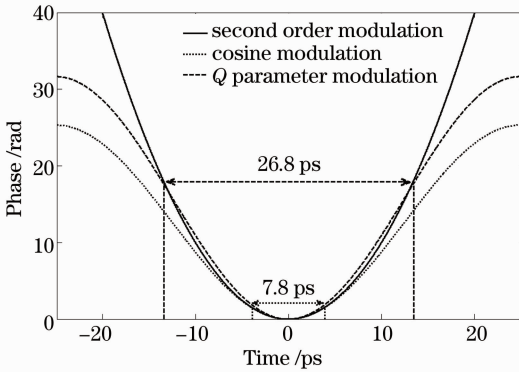


图 5 理想二次相位调制、普通余弦调制和  $Q$  参数调制法产生的相位调制

Fig. 5 Different phase modulations produced by second order, cosine and  $Q$  parameter modulations

对上述系统中的输入高斯光脉冲,分别采用普通余弦调制和最佳  $Q$  值时的参数调制法进行调制,研究两种情况下系统输出脉冲功率的变化以及二者对调制电压的需求,结果如图 6 所示。观察该图可知,采用普通余弦电压调制的时间透镜实验系统,可将输入峰值功率为  $1 \text{ mW}$  的光脉冲提升到  $2.887 \text{ mW}$ ,FWHM 从  $5 \text{ ps}$  压缩到  $1.6 \text{ ps}$ ,脉宽压缩倍率为  $3.11$ 。而采用最佳  $Q$  值的参数调制后,输出峰值功率增长到  $4.232 \text{ mW}$ ,FWHM 压缩到  $1.12 \text{ ps}$ ,压缩倍率为  $4.46$ 。与普通余弦调制相比,参数调制后的压缩倍率提高了  $43.8\%$ ,更接近理论压缩倍数  $5$ 。可以说,采用参数调制法可以非常有效地提高时间成像系统的性能。不过,由于使用二次项来补偿四次项,时间项的不对称导致了图 6 中旁瓣的产生。

另外,从图 6 中小图可以看出,采用参数调制时,电压从  $4.03V_\pi$  提升到  $5.04V_\pi$ ,提升了  $0.25$  倍。这正是由于在原电压上乘上了参数调制因子  $(1+Q)$ ,使得电光相位调制器的调制电压幅值提高了  $0.25$  倍。此外,根据电光相位调制时间透镜的分辨率公式<sup>[18]</sup>

$$t_0 = \frac{2.77V_\pi}{\pi V_0 \omega_m}, \quad (17)$$

调制电压幅度  $V_0$  的提高也有助于得到更高的时间

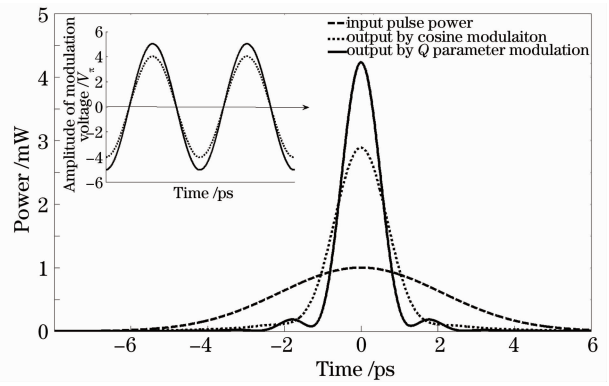


图 6 分别采用普通余弦调制和参数调制法时,输出光脉冲功率以及所需电压的对比情况

Fig. 6 Comparison of power and modulation voltage requirement of output optical pulse by using cosine modulation and  $Q$  parameter modulation, respectively

分辨率。

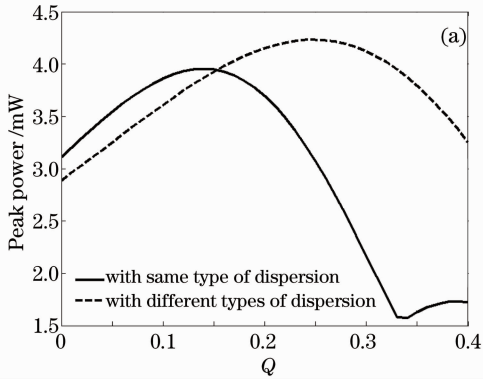
参数调制法是以提高调制电压幅度为代价来换取孔径的增大,虽然在一定程度上有助于提高系统的时间分辨率,但是对高频调制电路系统来讲,增大其调制电压幅值将大幅度提升系统的成本。因此,在使用参数调制法时,应在改善系统性能的同时,尽可能减小调制电压。

### 3.3 系统色散对调制电压的影响

由(6)式可知,降低基于电光相位调制的时间透镜系统的调制电压幅值的途径有三种:1)减小电光晶体的半波电压,2)增大驱动信号的调制频率,3)减小时间透镜系统中输入和输出两段光纤色散量的倒数之和  $D$ 。对于一定的实验系统,电光晶体具有确定的半波电压,而增大调制频率反而会降低孔径。因此,一个行之有效的途径就是通过减小  $D$  值来降低调制电压。通过在时间透镜系统中使用色散符号相反的两段光纤作为输入和输出色散模块,这样,系统的  $D$  值会相互抵消一部分,从而减小了  $D$  值,而符号的改变不会影响系统的放大或压缩倍数。即利用色散补偿机制减小  $D$  值,从而降低调制电压。

图 7 为输入输出两段光纤采用不同类型色散时,实验系统的输出功率和所需调制电压的变化情况。其中,两段光纤的二阶色散采取相同类型时,选取  $\beta_{21} = \beta_{22} = 20 \text{ ps}^2/\text{km}$ ;而两段二阶色散采取不同类型时,选取  $\beta_{21} = 20 \text{ ps}^2/\text{km}$  和  $\beta_{22} = -20 \text{ ps}^2/\text{km}$ ,光脉冲以及其他系统参数与上文系统相同。由图 7(a)可见,两段色散异号时,其输出脉冲随  $Q$  值变化的最大峰值功率要比色散同号时的峰值功率略高一些。另外,达到最大峰值功率的  $Q$  值(即最佳

Q值)也要比两段色散同号时高。由图7(b)可以看出,色散为异号时所需的调制电压要比色散为同号时低很多。当 $Q=0$ 时,色散为同号所需的调制电压幅度为 $6V_{\pi}$ ,而色散为异号仅需 $4V_{\pi}$ ;其最佳Q值点的电压,为图中星号点位置,色散为同号时所需的



调制电压为 $6.91V_{\pi}$ ,而色散为异号时只需要 $5.04V_{\pi}$ ,调制电压幅度下降较明显。因此,将色散补偿机制应用到参数调制法的电光相位调制时间透镜中可以有效降低调制电压幅度。

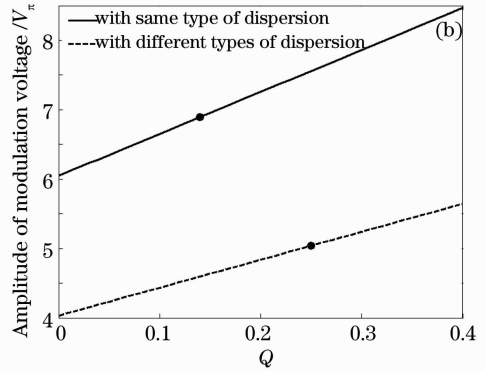


图7 输入输出段光纤采用不同类型二阶色散时,时间透镜输出脉冲功率及其调制电压幅值随Q值的变化情况。

(a)输出脉冲功率随Q值变化情况;(b)为调制电压幅值随Q值变化情况

Fig. 7 Peak power and modulation voltage amplitude of the output optical pulse along versus modulation parameter  $Q$  using input and output optical fibers with different types of dispersion. (a) Output pulse peak power versus modulation parameter  $Q$ ; (b) amplitude of modulation voltage versus modulation parameter  $Q$

## 4 结 论

基于电光相位调制的时间透镜通常使用余弦调制来近似实现二次相位调制,导致只能在调制中心附近实现近似的二阶相位调制,使时间透镜受到孔径限制。在光脉冲压缩中,孔径效应的存在限制了压缩脉冲的宽度以及系统速率。为了增大基于电光相位调制时间透镜的孔径,提出一种参数调制法。理论推导出参数调制法提高时间孔径的原理,通过数值模拟研究了调制参数 $Q$ 的选择对孔径的影响,并结合时间透镜在光脉冲压缩中的应用,验证了参数调制法对时间透镜的孔径的改进以及对系统输出性能的提升。同时,考虑到高速调制系统中,增加调制电压幅度对系统成本的影响,研究了输入段和输出段光纤色散对调制电压的影响。研究表明,选取相反的输入段和输出段色散可以有效降低调制电压,而对系统的压缩和放大系数不会产生负面影响。该参数调制法仅需对电光相位调制时间透镜本身参数做调整,无需引入新器件,即可将文中时间系统的时间孔径由仅占调制周期的15.6%提高到50%以上,使光脉冲的压缩系数更接近理想值。该研究成果为进一步优化基于电光相位调制的时间透镜系统的性能提供了一种简洁而有效的手段。

## 参 考 文 献

- 1 B H Kolner, M Nazarathy. Temporal imaging with a time lens [J]. *Opt Lett*, 1989, 14(12): 630–632.
- 2 A A Godil, B A Auld, D M Bloom. Time-lens producing 1.9 ps optical pulses [J]. *Appl Phys Lett*, 1993, 62(10): 1047–1049.
- 3 C V Bennett, R P Scott, B H Kolner. Temporal magnification and reversal of 100 Gb/s optical data with an up-conversion time microscope [J]. *Appl Phys Lett*, 1994, 65(20): 2513–2515.
- 4 He Zhou, Mei Junyao, Wang Chuanbiao, *et al.*. A 10 Gb/s high-speed optical communication system without dispersion compensation based on time lens [J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(1): 0105007.  
何舟, 梅君瑶, 王传彪, 等. 一种基于时间透镜的10 Gb/s无色散补偿高速光纤通信系统[J]. *中国激光*, 2011, 38(1): 0105007.
- 5 Li Yuan, Li Wei, Yang Kecheng, *et al.*. Experimental implementation of an all-optical OFDM system based on time lenses [J]. *Chin Opt Lett*, 2010, 8(3): 275–277.
- 6 M T Kauffman, W C Banyai, A A Godil, *et al.*. Time-to-frequency converter for measuring picosecond optical pulses [J]. *Appl Phys Lett*, 1994, 64(3): 270–272.
- 7 A A Godil, B A Auld, D M Bloom. Picosecond time-lenses [J]. *IEEE J Quantum Electron*, 1994, 30(3): 827–837.
- 8 S Kumar. Compensation of third-order dispersion using time reversal in optical transmission systems [J]. *Opt Lett*, 2007, 32(4): 346–348.
- 9 K Petrillo, M A Foster. Scalable 1.28-Tb/s transmultiplexer using a time lens [C]. *Conference on Lasers and Electro-Optics San Jose*, 2011. JTu177.
- 10 B H Kolner. Space-time duality and the theory of temporal imaging [J]. *IEEE J Quantum Electron*, 1994, 30(8): 1951–1963.
- 11 C V Bennett, B H Kolner. Principles of parametric temporal imaging—part I: system configurations [J]. *IEEE J Quantum Electron*, 2000, 36(4): 430–437.

- 12 T T Ng, F Parmigiani, M Ibsen, *et al.*. Compensation of linear distortions by using XPM with parabolic pulses as a time lens [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2008, 20(13): 1097–1099.
- 13 R Salem, M A Foster, A C Turner, *et al.*. Optical time lens based on four-wave mixing on a silicon chip [J]. *Opt Lett*, 2008, 33(10): 1047–1049.
- 14 Deng Yongkai, Li Ye, Cao Jianping, *et al.*. Suppression of fluctuation of residual amplitude modulation in electro-optical phase modulators [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(7): 1063–1068.  
邓勇开, 李 烨, 曹建平, 等. 电光相位调制器中剩余幅度调制变化的抑制[J]. *光学学报*, 2006, 26(7): 1063–1068.
- 15 V B Yurchenko. Improving the accuracy of a time lens [J]. *J Opt Soc Am B*, 1997, 14(11): 2921–2924.
- 16 J V Howe, J Hansryd, C Xu. Multiwavelength pulse generator using time-lens compression [J]. *Opt Lett*, 2004, 29(13): 1470–1472.
- 17 L E Munioz-Camuniez, V Torres-Company, J Lancis, *et al.*. Electro-optic time lens with an extended time aperture [J]. *J Opt Soc Am B*, 2010, 27(10): 2110–2115.
- 18 Li Bo, Tan Zhongwei, Zhang Xiaoxing. Experiment and simulation of time lens using electro-optic phase modulation and cross modulation [J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(8): 084204.  
李 博, 谭中伟, 张晓兴. 利用电光相位调制和交叉相位调制制作时间透镜的实验及仿真分析[J]. *物理学报*, 2011, 60(8): 084204.

栏目编辑: 王晓球