

# 基于配对误差补偿方法的拼接光栅压缩池理论研究\*

左言磊<sup>1)†</sup> 魏晓峰<sup>1)</sup> 朱启华<sup>1)</sup> 刘红婕<sup>1)</sup> 王 道<sup>1)</sup> 黄 征<sup>1)</sup> 郭 仪<sup>1)</sup> 应纯同<sup>2)</sup>

1) 中国工程物理研究院, 绵阳 621900)

2) 清华大学工程物理系, 北京 100084)

(2006 年 8 月 7 日收到, 2006 年 12 月 4 日收到修改稿)

利用傅里叶光学方法, 研究了一个基于配对误差补偿方法的单程拼接光栅压缩池系统, 得到远场时域关于系统拼接误差的积分表达式, 揭示了配对误差补偿方案下系统的群延迟、脉冲前沿倾斜、剩余啁啾效应对叠加后远场时域的影响规律. 数值模拟表明, 随着带宽增加, 配对补偿法将导致脉冲远场时域展宽; 对一个利用配对误差补偿的单程拼接光栅压缩池系统进行计算, 得到该方案下各种拼接误差的容限; 同时考虑所有误差的情况下得到系统的允许带宽曲线.

关键词: 拼接光栅压缩池, 配对补偿, 相干叠加, 远场

PACC: 4225B, 4225F

## 1. 引 言

近年来由于啁啾脉冲放大技术<sup>[1]</sup>的应用, 使得获得更高能量、更高强度的超短脉冲成为可能. 这给很多领域的研究工作提供了有力的工具, 如光与物质相互作用<sup>[2]</sup>、惯性约束聚变中的快点火实验<sup>[3]</sup>研究等. 在普通 CPA 系统中, 产生的超短激光脉冲的能量受限于压缩池中光栅的损伤阈值和口径. 目前性能最好的光栅是多层电介质(MLD)全息光栅<sup>[4-6]</sup>, 但是该光栅的制造非常困难, 很难加工到大尺寸( $< 1\text{ m}$ ). Zhang 等人<sup>[7]</sup>提出了一种阵列式压缩池的设计, 通过光栅拼接的方法增大压缩池内的通光口径增加输出脉冲的能量.

Kessler 等<sup>[8]</sup>提出了配对误差补偿<sup>[9]</sup>的概念, 它是根据某两种拼接误差对光束的影响相似的特点, 在调整过程中通过调整某一种误差来抵消另一种误差的影响, 降低了实验调整难度, 但是由于实际上补偿只能针对于中心波长, 这必将会对远场时域产生影响.

## 2. 理论模型

本文的研究是建立在分析光束通过一失调的单

程光栅对压缩池后的远场能量分布的基础上的. 如图 1 所示, 在  $G_1, G_2$  组成的拼接光栅对压缩池中,  $G_2$  由两子光栅  $G_{2A}, G_{2B}$  拼接而成, 并且只有子光栅  $G_{2A}$  存在失调, 其他光栅都假设处于理想位置(光栅母线方向为  $y$  轴方向). 光束经过失调的拼接光栅对压缩池的过程中, 被不同的子光栅衍射的光束受到不同的时空调制, 成为两相干子束, 它们在理想透镜的焦平面处进行相干叠加.

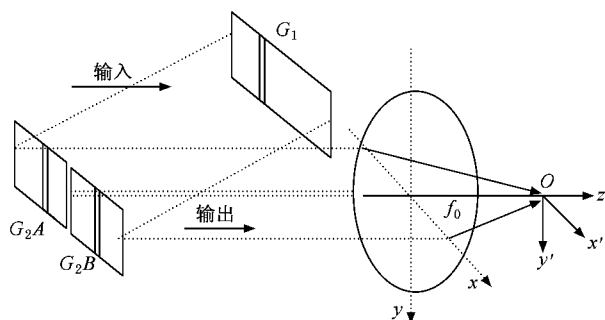


图 1 啁啾脉冲通过拼接光栅对压缩池和理想透镜示意图

### 2.1. 配对误差补偿方案下拼接光栅对压缩池的误差模型

图 2 为光栅拼接过程中存在的各种误差示意图, 光栅母线方向为竖直方向. 定义拼接误差如下:

\* 国家高技术研究发展计划(863)项目(批准号:2006AA84502)和高温高密度等离子体物理国防科技重点实验室项目(批准号:9140C680302060C6801)资助的课题.

† E-mail: zuoyanlei@tsinghua.org.cn

光栅缝隙(端面间距),错位误差(栅面间距),垂直角偏(绕光栅矢量方向的偏转),水平角偏(绕光栅母线的偏转),母线偏转(母线在光栅面内的偏转),以及光栅刻线宽度误差.

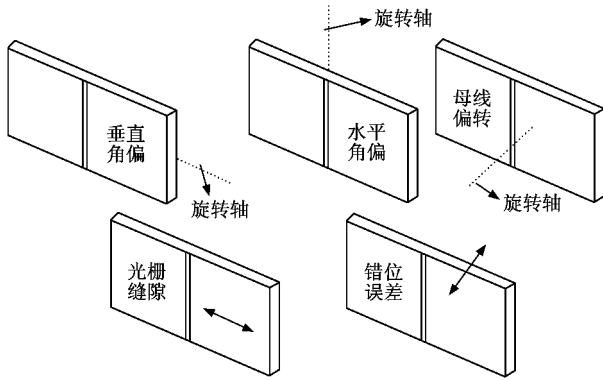


图 2 光栅误差类型示意图

其中错位误差和光栅缝隙误差对光束的影响都是附加了相位延迟;垂直角偏和母线偏转误差都是导致光束在图 1 中  $yz$  平面内以  $x$  为轴旋转;刻线宽度误差和水平角偏误差都导致光束在图 1 中  $xz$  平面内以  $y$  为轴旋转.

### 2.1.1. 光栅缝隙和错位误差

光栅缝隙和错位误差对失调脉冲的附加相位延迟为

$$\phi_s = \frac{\Delta s}{d} \cdot 2\pi,$$

$$\phi_p = \frac{\Delta p}{\lambda} \cdot (\cos\alpha(\omega) + \cos\beta) \cdot 2\pi, \quad (1)$$

其中  $\Delta s$   $\Delta p$  分别为光栅缝隙和错位误差值; $d$  为光栅刻线宽度, $\lambda$  为波长; $\alpha(\omega)$   $\beta$  分别为拼接光栅上脉冲的入射角和衍射角.根据配对误差补偿概念,这两种误差在中心波长  $\lambda_0$  处抵消,此时这两种误差对失调脉冲的总附加相位延迟为

$$\phi(\omega) = \Delta p \cdot 2\pi \times \left[ \frac{\cos\alpha(\omega) + \cos\beta}{\lambda} - \frac{\cos\alpha_0 + \cos\beta}{\lambda_0} \right], \quad (2)$$

式中  $\alpha_0$  为中心波长成分的入射角.

### 2.1.2. 刻线宽度误差与水平角偏误差

根据光栅方程,刻线宽度误差与水平角偏误差对失调脉冲的角偏影响分别为

$$\begin{aligned} \epsilon_{x1} &\cong \frac{\Delta d}{d^2} \cdot \frac{\lambda}{\cos\beta}, \\ \epsilon_{x2} &\cong \Delta\xi \left( 1 + \frac{\cos\alpha(\omega)}{\cos\beta} \right), \end{aligned} \quad (3)$$

式中  $\Delta d$   $\Delta\xi$  分别为刻线宽度误差和水平角偏误差的值,在配对误差补偿条件下,这两种误差对失调脉冲在图 1 中  $xz$  平面内的总的角偏为

$$\epsilon_x = \frac{\Delta d}{d^2} \cdot \frac{1}{\cos\beta} \cdot \left( \lambda - \frac{\lambda_0 \cdot (\cos\alpha(\omega) + \cos\beta)}{\cos\alpha_0 + \cos\beta} \right), \quad (4)$$

式中角偏  $\epsilon_x$  是指图 1 坐标系中  $xz$  平面内失调光束与  $z$  轴的夹角.

### 2.1.3. 母线偏转和垂直偏转误差

根据文献 [10],母线偏转误差和垂直角偏误差对失调光束在图 1 中  $yz$  平面内的角偏影响分别为

$$\begin{aligned} \epsilon_{y1} &\cong \Delta\delta \cdot (\sin\alpha(\omega) + \sin\beta), \\ \epsilon_{y2} &\cong \Delta\zeta \cdot (\cos\alpha(\omega) + \cos\beta), \end{aligned} \quad (5)$$

式中  $\Delta\delta$   $\Delta\zeta$  分别为母线偏转误差和垂直角偏误差的值.在配对误差补偿条件下,这两种误差对失调脉冲在  $yz$  平面内的角偏总影响为

$$\begin{aligned} \epsilon_y &= \Delta\delta \cdot \left[ \sin\alpha(\omega) + \sin\beta \right. \\ &\quad \left. - \frac{\sin\alpha_0 + \sin\beta}{\cos\alpha_0 + \cos\beta} (\cos\alpha(\omega) + \cos\beta) \right], \end{aligned} \quad (6)$$

式中角偏  $\epsilon_y$  是指图 1 坐标系中  $yz$  平面内失调光束与  $z$  轴的夹角.

## 2.2. 啁啾脉冲通过失调的单程拼接光栅对压缩池

根据文献 [11],啁啾脉冲高斯光束通过单程光栅对压缩池后的频率域表达式为

$$\begin{aligned} E(x, y, \Delta\omega) \\ \propto \exp \left[ -\frac{\tau_0^2 \Delta\omega^2}{4} - \frac{(x + \gamma \cdot \Delta\omega \cdot z_0)^2 + y^2}{\sigma^2} \right], \end{aligned} \quad (7)$$

式中  $\sigma$  为光腰尺寸,  $\Delta\omega = \omega - \omega_0$  表征偏离中心频率的大小,  $\tau_0$  为脉宽参数; $x$   $y$   $z$  为图 1 坐标系中座标,  $x$  为光栅色散方向,  $z_0$  为图 1 中光栅  $G_1$   $G_2$  中心距;  $\gamma = \frac{2\pi c}{d \cos\alpha_0} \cdot \frac{1}{\omega_0^2}$ . 当图 1 中的拼接子光栅

$G_2 A$  存在如上所述误差时,通过拼接光栅后的两子光束的表达式可以记为

$$\begin{aligned} E_1(x, y, \Delta\omega) \\ = E(x, y, \Delta\omega), \quad x \geq 0, \\ E_2(x, y, \Delta\omega) \\ = E(x, y, \Delta\omega) \\ \times \exp[i\phi(\omega) + ik\epsilon_x x + ik\epsilon_y y], \quad x \leq 0 \end{aligned} \quad (8)$$

式中  $k$  为任意频率波矢.可以将上式中的附加相位项化简如下:

$$\begin{aligned} \phi(\omega) &\approx \phi_1 \cdot (\omega - \omega_0) + \phi_2 \cdot (\omega - \omega_0)^2 / 2 \quad (9) \\ k(\varepsilon_x x + \varepsilon_y y) \\ &\approx \frac{\omega_0}{c} \cdot \left[ \frac{\partial \varepsilon_x}{\partial \omega}(\omega_0) \cdot x + \frac{\partial \varepsilon_y}{\partial \omega}(\omega_0) \cdot y \right] \cdot (\omega - \omega_0) \\ &+ \frac{1}{c} \cdot \left\{ \left[ \frac{\partial \varepsilon_x}{\partial \omega}(\omega_0) \cdot x + \frac{\partial \varepsilon_y}{\partial \omega}(\omega_0) \cdot y \right] \right. \\ &+ \left. \frac{\omega_0}{2} \cdot \left[ \frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial \omega^2}(\omega_0) \cdot x + \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial \omega^2}(\omega_0) \cdot y \right] \right\} \\ &\times (\omega - \omega_0)^2, \end{aligned} \quad (10)$$

其中,  $\phi_1, \phi_2$  分别为  $\phi(\omega)$  的 1, 2 阶色散系数. 显然 (10) 式中等号右边的两项分别是文献 [12] 中所提到的角色散导致的脉冲前沿倾斜效应和啁啾效应, 它们将分别对通过失调光栅  $G_2A$  的子脉冲产生群延迟效应和脉冲展宽效应.

对 (8) 式作傅里叶变换可得该压缩池的输出子脉冲分别为

$$E_1(t) = C_1 \exp \left[ -\frac{t^2}{\tau_0^2(1+u)} - \frac{x^2}{\sigma^2(1+u)} - \frac{y^2}{\sigma^2} + i \frac{uxt}{(1+u)\gamma_{z_0}} \right], \quad x \geq 0, \quad (11)$$

$$E_2(t) = C_2 \exp \left[ \frac{(\gamma_{z_0} x / \sigma^2 + i \chi (t - \phi'_1))^2}{\tau_0^2(1+u)4 - i \phi'_2} \right] \times \exp \left( -\frac{x^2 + y^2}{\sigma^2} \right), \quad x \leq 0, \quad (12)$$

其中,  $u = \frac{4\gamma_{z_0}^2}{\sigma^2 \tau_0^2}$  为表征光束变椭程度的参数, 系数

$$C_1 = \frac{2}{\tau_0} \sqrt{\frac{\pi}{1+u}},$$

$$C_2 = \sqrt{\frac{\pi}{\tau_0^2(1+u)4 - i \phi'_2}};$$

$$\phi'_1 = \phi_1 + \frac{\omega_0}{c} \cdot \left[ \frac{\partial \varepsilon_x}{\partial \omega}(\omega_0) \cdot x + \frac{\partial \varepsilon_y}{\partial \omega}(\omega_0) \cdot y \right],$$

$$\begin{aligned} \phi'_2 &= \phi_2 / 2 + \frac{1}{c} \cdot \left\{ \left[ \frac{\partial \varepsilon_x}{\partial \omega}(\omega_0) \cdot x + \frac{\partial \varepsilon_y}{\partial \omega}(\omega_0) \cdot y \right] \right. \\ &+ \left. \frac{\omega_0}{2} \cdot \left[ \frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial \omega^2}(\omega_0) \cdot x + \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial \omega^2}(\omega_0) \cdot y \right] \right\}. \end{aligned}$$

### 2.3. 脉冲在远场的叠加

从单程光栅对压缩池输出的高斯脉冲空间呈椭圆分布, 其长轴方向为色散方向. 如图 3 所示, 其中光束 1 为理想光束, 2 为失调光束, 根据文献 [13], 光束 1 的远场分布为

$$E_{1f}(p, q, t) \propto \int_0^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E_1(x, y, \Delta\omega)$$

$$\begin{aligned} &\times \exp \left[ -i \frac{\omega_0 + \Delta\omega}{c} (px + qy) - i \Delta\omega t \right] \\ &\times d\Delta\omega dy dx, \end{aligned} \quad (13)$$

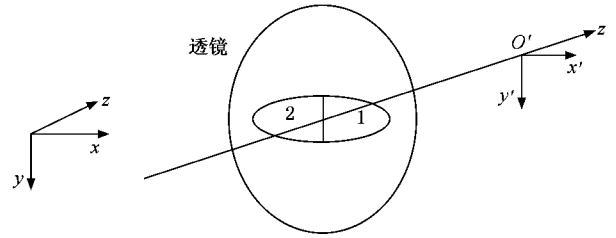


图 3 椭圆子光束通过理想透镜的聚焦

式中  $p = \frac{x'}{f}, q = \frac{y'}{f}$  ( $x', y'$ ) 为透镜焦平面上的坐标,  $f$  为透镜焦距,  $c$  为光速. 将上式中的频率项积分可得

$$\begin{aligned} &\int_{-\infty}^{+\infty} E_1(x, y, \Delta\omega) \\ &\times \exp \left[ -i \cdot \frac{1}{c} \cdot \Delta\omega \cdot (px + qy) \right] d\Delta\omega \\ &= E'_1(x, y, t) = E_1 \left( t + \frac{px + qy}{c} \right). \end{aligned}$$

(13) 式简化为

$$E_{1f}(t) = \int_0^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E_1 \left( t + \frac{px + qy}{c} \right) \times \exp[-ik_0(px + qy)] \cdot dy dx. \quad (14)$$

同样可得失调子光束 2 的远场表达式

$$E_{2f}(t) = \int_0^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E_2 \left( t + \frac{px + qy}{c} \right) \times \exp[-ik_0(px + qy)] \cdot dy dx. \quad (15)$$

### 3. 数值模拟

模拟所取参数为一标准的点火脉冲系统参数, 如表 1 所示.

表 1 数值模拟所用参数

刻线密度/mm <sup>-1</sup>	光腰尺寸/cm	中心波长/mm	脉宽/ps	透镜焦距/m	光栅对垂直间距/m	入射角/(°)
1740	20	1053	0.1—1	2.0	2	72

根据前面的分析, 在配对误差补偿方案下系统的剩余误差对脉冲的影响主要是时域特性, 而且在光栅拼接实验中往往采取监控远场时域的方法, 因此模拟是针对单束失调子脉冲的远场时域以及叠加后的远场时域特性进行的.

### 3.1. 光栅缝隙与光栅错位误差

系统中只对平移型误差进行配对补偿,不同的带宽条件下,脉冲远场几何焦点处时域展宽倍数与失调误差的关系如下图所示,其中横坐标为错位误差值,纵坐标为时域展宽倍数.其中时域展宽倍数的定义为

$$\Gamma = \frac{\Delta T_e - \Delta T_0}{\Delta T_0}$$

其中  $\Gamma$  为展宽倍数,  $\Delta T_e$  为失调时脉冲远场时域的半高全宽,  $\Delta T_0$  为理想情况下的半高全宽.

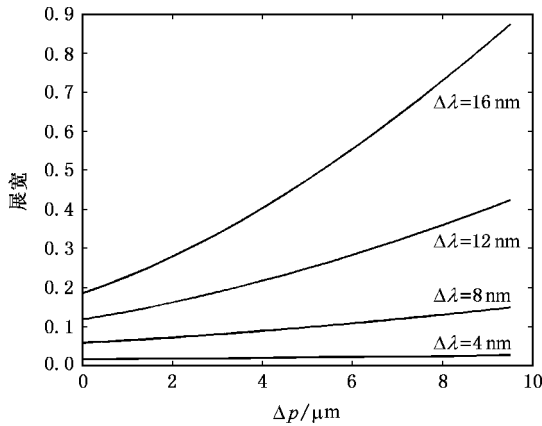


图 4 失调子脉冲的远场时域展宽曲线

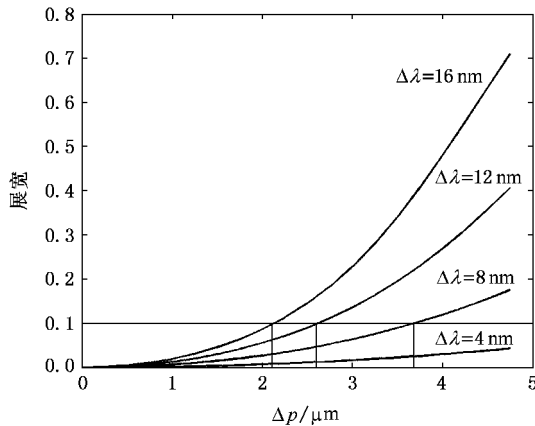


图 5 远场叠加后的时域展宽曲线

由于分析对象是单程光栅对压缩池,在拼接光栅  $G_2$  面上存在一个谱空间走离效应,因此即便系统中平移型误差为零,失调子光束的远场也存在脉冲时域展宽现象,如图 4 所示,在配对补偿方案下,随着误差的增加,失调脉冲中的剩余二阶色散项也增加,导致失调子脉冲远场时域展宽,而且这种效应

与系统的带宽大小成正比.而对于叠加场的时域,如图 5 所示,其展宽的程度要大于单脉冲的情形,这是因为其不但与失调脉冲中的剩余二阶色散项有关,还与剩余一阶群延迟效应有关.若要求脉冲远场的时域展宽为小于 10%,则对于带宽分别是  $\Delta\lambda = 8, 12, 16 \text{ nm}$  的系统,允许的光栅错位误差限分别为  $3.7, 2.6, 2.1 \mu\text{m}$ .

### 3.2. 刻线宽度误差与水平角偏误差

若系统中刻线宽度误差与水平角偏误差满足配对补偿,不同的带宽条件下,脉冲远场几何焦点处时域展宽倍数与失调误差的关系如图 6 和图 7 所示.可见,失调子脉冲与叠加脉冲的远场时域都出现展宽现象,而且与错位误差相反,前者的展宽程度要高于后者.这是因为随着刻线宽度误差的增加,在配对补偿条件下,失调子脉冲中的角色散程度增加,它的两个基本效应:脉冲前沿倾斜和剩余啁啾都会引起失调脉冲远场时域的展宽,而非失调子脉冲的叠加则会相对减弱这种效应.值得注意的是,根据前面的分析,脉冲前沿倾斜与剩余啁啾都与脉冲的口径成正比,但是当系统带宽较大时,对小口径的脉冲的模拟表明,时域展宽效应甚至大于大口径时的情况,如图 7 中曲线所示,这是因为单程光栅对压缩池的输出脉冲是变椭的,其程度反比于脉冲直径,当脉冲口径较小时,其输出脉冲的横向尺寸甚至大于口径较大时的情况.同样,若要求脉冲远场的时域展宽为小于 10%,则对于带宽分别是  $\Delta\lambda = 8, 12, 16 \text{ nm}$  的系统,允许的刻线宽度误差限分别为  $\Delta d/d = 3.8 \times 10^{-6}, 2 \times 10^{-6}, 1.2 \times 10^{-6}$ .

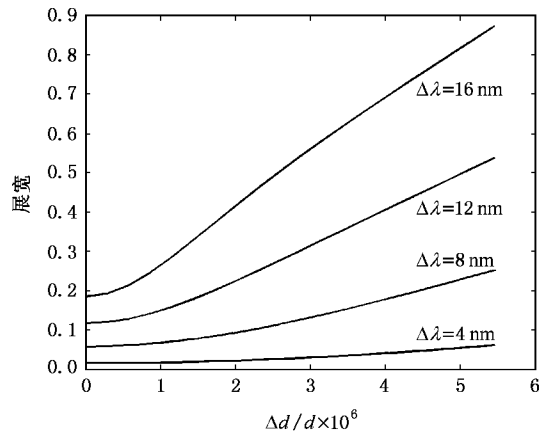


图 6 失调脉冲远场时域关于刻线误差展宽曲线

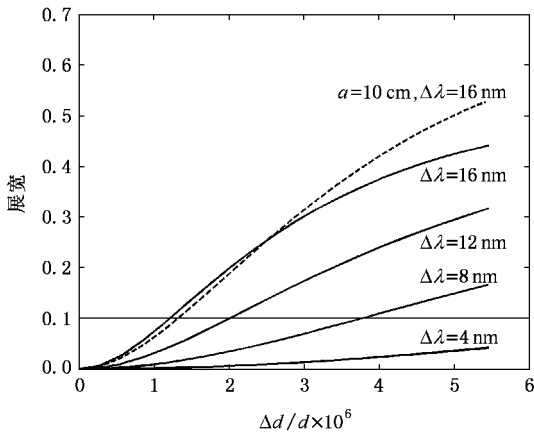


图 7 叠加远场时域关于刻线误差的展宽曲线

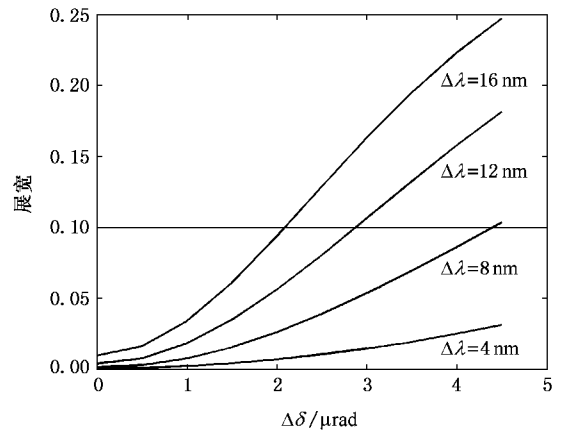


图 9 叠加远场时域关于母线偏转误差的展宽曲线

### 3.3. 母线偏转误差和垂直角偏误差

若系统中垂直角偏误差与母线偏转误差满足配对补偿,不同的带宽条件下,脉冲远场几何焦点处时域展宽倍数与失调误差的关系如图 8 和图 9 所示,其中横坐标为母线偏转误差值,纵坐标为时域展宽倍数.

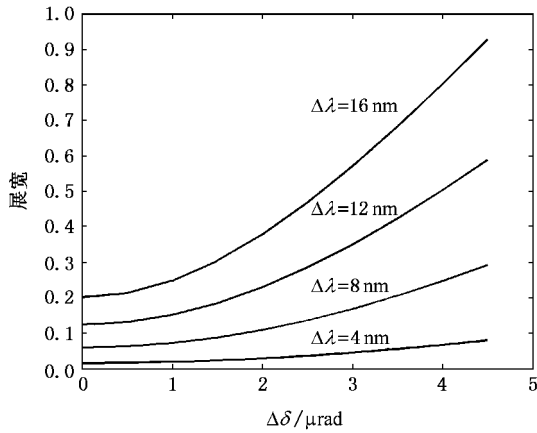


图 8 失调脉冲远场时域关于母线偏转误差展宽曲线

与 3.2 节中类似,单束失调子脉冲(图 8)与叠加脉冲的远场时域均出现展宽情况,并且随着误差值与系统带宽的增加而增大.若要求脉冲远场的时域展宽为小于 10%,则对于带宽分别是  $\Delta\lambda = 8, 12, 16$  nm 的系统,母线偏转误差的误差限要求分别为  $\Delta\delta = 4.5, 2.8, 2.0$   $\mu\text{rad}$ .

### 3.4. 同时考虑所有拼接误差都存在配对补偿的情况

在一个采用配对误差补偿方案的实际的拼接光栅压缩池中,往往是以上 3 种情况同时存在的.不妨设上述 3 种误差值为  $\Delta p = 2$   $\mu\text{m}$ ;  $\Delta d/d = 2 \times 10^{-6}$ ;  $\Delta\delta = 2$   $\mu\text{rad}$ (实际误差一般大于该值,因此为保守估计),计算不同输入带宽下,叠加场的时域展宽曲线如图 10(所取参数见表 1).

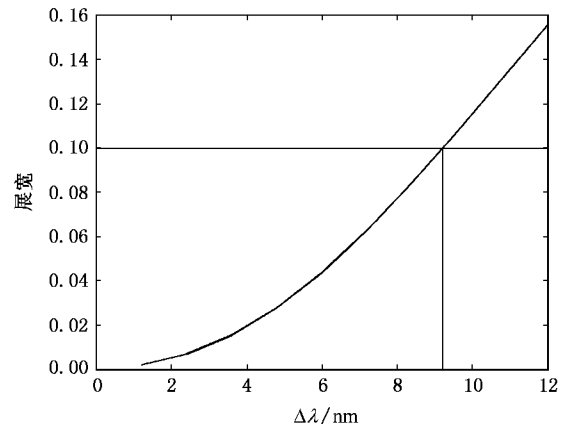


图 10 叠加场时域展宽关于带宽的曲线

由图 10 可见,在所设的误差条件下,表 1 中参数对应的单程拼接压缩池的输入带宽应该满足  $\Delta\lambda < 9.2$  nm 才能使得远场时域展宽小于 10%.

## 4. 结 论

本文利用傅里叶光学方法建立了一个能够分析配对补偿方案下光栅拼接误差容限的数学模型,揭

示了配对误差补偿方案下系统的剩余误差对远场时域的影响规律. 利用该模型对一个具体的单程拼接光栅压缩池系统进行了数值计算, 在要求远场时域展宽限制在 10% 以内的条件下, 系统中拼接误差以及带宽应满足的条件如表 2 所示.

初步的光栅拼接实验发现, 两拼接子光栅的相对位置受环境因素(特别是温度)以及光栅架的稳定性的影响显著, 一般为几  $\mu\text{m}$  和几  $\mu\text{rad}$ , 因此根据表 2 中的数据, 对一个典型的单程拼接光栅压缩池系

表 2 远场时域展宽小于 10% 时系统的拼接误差容限

$\Delta\lambda/\text{nm}$	$\Delta\rho/\mu\text{m}$	$\Delta\delta/\mu\text{rad}$	$\Delta\zeta/\mu\text{rad}$	$\Delta\xi/\mu\text{rad}$	$(\Delta d/d)10^{-6}$
8	< 3.7	< 4.5	< 10.6	8.9	< 3.8
12	< 2.6	< 2.8	< 6.6	4.7	< 2
16	< 2.1	< 2.0	< 4.7	2.8	< 1.2
< 8.6	2	2			2

统, 若使用配对误差补偿方案, 其系统带宽应该满足  $\Delta\lambda < 9.2 \text{ nm}$ .

- [ 1 ] Perry M D , Mourou G 1994 *Science* **264** 917
- [ 2 ] Norreys P A , Allott R , Clark R J 2000 *Physics of Plasmas* **7** 3721
- [ 3 ] Kitagiwa Y , Fujita H 2004 *IEEE J. Quantum Electron.* **40** 281
- [ 4 ] Li L , Hirsh J 1995 *Opt. Lett.* **20** 1349
- [ 5 ] Shore B W , Perry M D , Britten J A *et al* 1997 *J. Opt. Soc. Am. A* **14** 1124
- [ 6 ] Kong W J , Liu S J , Shen J 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1143 ( in Chinese ) [ 孔伟金、刘世杰、沈 健 2006 物理学报 **55** 1143 ]
- [ 7 ] Zhang T J 1998 *Opt. Commun.* **145** 367
- [ 8 ] Kessler T J , Bunkenburg J , Huang H 2004 *Opt. Lett.* **29** 635
- [ 9 ] Zeng L , Li L 2006 *Opt. Lett.* **31** 152
- [ 10 ] Zuo Y L , Wei X F , Zhu Q H 2006 *High Power Laser and Particle Beams* **18** 1619 ( in Chinese ) [ 左言磊、魏晓峰、朱启华 2006 强激光与粒子束 **18** 1619 ]
- [ 11 ] Martinez O E 1986 *J. Opt. Soc. Am. B* **3** 929
- [ 12 ] Osvay K , Kovacs A P , Herner Z 2004 *IEEE J. Quantum Electron.* **10** 213
- [ 13 ] Born M , Wolf E 1989 *Principles of Optics* ( Pergamon , London )

## Theory of array-grating compressor based on in-pair compensation of errors \*

Zuo Yan-Lei<sup>1,2†</sup> Wei Xiao-Feng<sup>1)</sup> Zhu Qi-Hua<sup>1)</sup> Liu Hong-Jie<sup>1)</sup> Wang Xiao<sup>1)</sup>  
Huang Zheng<sup>1)</sup> Guo Yi<sup>1)</sup> Ying Chun-Tong<sup>2)</sup>

<sup>1</sup> *Chinese Academy of Engineering Physics , Mianyang 621900 , China*

<sup>2</sup> *Department of Engineering Physics , Tsinghua University , Beijing 100084 , China*

( Received 7 August 2006 ; revised manuscript received 4 December 2006 )

### Abstract

In terms of Fourier optics , a single-pass tiled-grating compressor based on in-pair compensation is studied and the amplitude expression of the output pulse from the compressor in the far-field is obtained , which disclose that effect of the group delay , the pulse front tilting and the residual chirping on the pulse-width in the far field. Numerical simulation shows that the pulse in the far field is broadened with increasing spectral width. For a typical single-pass tiled-grating compressor , the tolerance of each error is obtained and the allowed spectral width is obtained when all errors are considered.

**Keywords :** tiled-grating compressor , in-pair compensation , coherent addition , far field

**PACC :** 4225B , 4225F

\* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China ( Grant No. 2006AA84502 ) and the Science and Technology foundation of State Key Laboratory of High Temperature and Density Plasma Physics ( Grant No. 9140C680302060C6801 ).

† E-mail : zuoyanlei@tsinghua.org.cn