

光谱扫描滤波法提升超强飞秒激光相干信噪比分析*

马再如¹⁾ 隋展^{2)†} 周桂勇¹⁾ 孙年春³⁾ 王屹山⁴⁾ 王向林⁴⁾ 张彬²⁾ 张蓉竹³⁾

1) (西华大学物理与化学学院, 成都 610039)

2) (中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

3) (四川大学电子信息学院, 成都 610064)

4) (西安光学精密机械研究所瞬态光学技术国家重点实验室, 西安 710119)

(2013年2月3日收到; 2013年4月9日收到修改稿)

光谱调制所形成的预脉冲和后沿脉冲的时频谱图将等间距、平行地分布于啁啾主脉冲时频谱图的两侧, 基于光谱调制啁啾光脉冲的这种时频谱特点, 采用扫描滤波方式来提升其对比度. 数值模拟分析了扫描滤波过程中时间抖动、扫描率差异和通带宽度等因素对扫描滤波效果的影响, 结论表明, 在扫描轨迹与信号光频率相同的情况下, 控制通带宽度, 相干信噪比提升率接近 $0.41F^2$ 倍, 而啁啾信号光以超过 90% 的透光率通过光谱扫描滤波器.

关键词: 超快激光技术, 相干信噪比, 光谱扫描滤波, 短时傅里叶变换法

PACS: 42.60.Rn, 42.65.Re

DOI: 10.7498/aps.62.154202

1 引言

基于啁啾脉冲放大 (CPA) 技术的超强激光技术取得了巨大的进展. 随着它们进一步的应用, 它的时域信噪比已经成为该类激光进一步发展和应用的瓶颈^[1-5], 如何提升该类激光信噪比得到了前所未有的重视, 是当前超强激光研究的热点领域^[6-24]. 在该类激光系统中, 信噪比常被理解为主脉冲的峰值强度与前沿背景噪声的强度之比.

当前, 在激光传播、放大的链路中, 为提升激光信噪比, 既可在激光链路的前端采用信噪比提升技术, 也可在激光链路的后端采用信噪比提升技术. 激光信噪比前端提升技术主要包括饱和吸收^[6], Nonlinear Sagnac interferometer^[7], 交叉偏振波 (XPW)^[8,9], 自衍射^[10], 相位共轭波产生^[11], 双 CPA 系统^[12-14], 光参量啁啾脉冲放大或参量放大^[15-21] 等技术手段; 而激光信噪比后端提升技术主要包括等离子镜 (PM)^[22] 和倍频等技术手段.

其中, 采用 Nonlinear Sagnac interferometer 能将信噪比提升四个量级, 由于引入了额外的非线性

效应, 需要对非线性效应进行仔细的补偿, 因此该技术较为复杂, 适应于小能量状态^[7]. 采用 XPW 技术可得到信噪比为 10^{10} — 10^{11} 水平的激光脉冲, 其转换效率经过优化后仅达 20%, 该技术工作于 TW 量级、 μJ — mJ 激光脉冲系统^[8,9]. 最近, 基于克尔介质的自衍射信噪比提升技术在实验中得到研究, 该技术能将信噪比提升 4 个量级, 但克尔介质中的散射光与角色散限制了它的进一步应用, 且其转换效率仅能达到 20%^[10]. 相位共轭波产生技术将信噪比提升了 3 个量级, 转换效率能达到 25%, 是很有前途的技术之一^[11]. 双 CPA 技术并结合清洁种子脉冲注入, 实验获得峰值功率达 70 TW, 信噪比可达 10^{12} ; 理论分析表明, 未压缩的能量 28 J, 峰值功率能达 600 TW 量级^[14]. 双 CPA 技术并结合 OPCPA 技术, 国内已经获得峰值功率超 PW、信噪比达到 10^{11} 水平的超强激光^[12].

Doumy 等人, 采用单个等离子体镜, 输出脉冲能量为 600 mJ, 脉宽 60 fs, 信噪比为 10^8 , 提高了两个量级, 转换效率为 70%^[22]; 他们还采用双 PM, 信噪比可提高 4 个量级, 到达 10^{10} 水平, 转换效率为 50%. 等离子体镜存在不能重复使用 (一次性的)、

* 国家高技术研究发展计划 (批准号: 2011AA1509) 和四川省教育厅重点项目 (批准号: 2233443) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: suizhan2011@yahoo.com.cn

系统转换效率不高和不方便使用等缺点. 采用倍频能显著提高的 ASE 的对比度 (达到 $> 10^{10}$), 但其转换效率、光谱带宽、脉冲时间和波前畸变都受到影响.

最近, 隋等 [22-24] 提出了采用光谱扫描滤波技术来提升飞秒激光的非相干信噪比, 该技术具有技术简单, 信噪比提升明显, 透过率高、可级联使用等优点. 但光谱扫描滤波技术对啁啾脉冲有何影响, 尤其是对压缩后的飞秒脉冲的信噪比有何影响的考虑则涉及较少.

在强激光与物质相互作用的过程中, 激光脉冲的波形是影响其作用效果的重要因素. 在啁啾脉冲的产生、传播、展宽、放大和压缩等过程中, 不可避免地存在光谱调制, 这些光谱调制是影响啁啾脉冲时间波形的重要因素, 如何精确控制其波形, 是需要研究的重点内容.

在啁啾脉冲放大系统中, 在脉冲的压缩阶段, 常常使用光栅对作为压缩器, 由于光栅对本身带宽约为 40 nm, 它将起到滤波的作用. 另外, 在激光与物质相互作用过程中, 主脉冲峰值前沿 10 ns 到 10 ps 的噪声是其关键的影响因素. 因此, 本文主要分析的是光谱扫描滤波法对光谱范围为 780 nm 到 820 nm (啁啾信号光的中心波长为 800 nm)、-10 ns 到 -10 ps 的光谱调制的滤波效果. 本文以快速扫描 F-P 干涉仪作为光谱扫描滤波器为例, 进一步研究它的通带宽度、时间同步精度和扫描斜率等参量对抑制光谱调制和提升激光系统相干信噪比的影响.

2 物理原理

本节先采用短时傅里叶变换分析了光谱调制啁啾脉冲的时频谱, 基于该类信号的时频谱特点, 提出采用光谱扫描滤波法来提升啁啾信号光信噪比, 并以快速扫描 F-P 干涉仪作为光谱扫描滤波器为例, 对扫描滤波方案进行了理论分析.

2.1 调制啁啾信号光脉冲的时频谱

假定光谱调制啁啾脉冲为

$$I(\omega) = I_0(\omega) [1 + a \cos(\omega T_0)], \quad (1)$$

其中, $I_0(\omega)$ 是未受调制的啁啾信号光光谱, a 是光谱振幅调制深度, T_0 是光谱调制周期. 据 (1) 式, 光

谱调制啁啾脉冲振幅为

$$A(\omega) = A_0(\omega) [1 + a \cos(\omega T_0)]^{1/2},$$

这里, $A_0(\omega)$ 为啁啾信号光的光谱振幅, 在调制幅度 $a \ll 1$ 情况下, 进行泰勒展开, 并取一阶近似, 则光谱调制啁啾脉冲振幅为

$$A(\omega) = A_0(\omega) \left[1 + \frac{a}{2} \cos(\omega T_0) \right].$$

对其进行逆傅里叶变换, 得到调制啁啾脉冲的光场为

$$U(t) = U_0(t) + \frac{a}{2} [U_0(t - T_0) + U_0(t + T_0)]. \quad (2)$$

从 (2) 式可见: 在光谱调制周期 T_0 远大于啁啾信号光的脉宽条件下, 光谱调制必然会在原始脉冲 $U_0(t)$ 前后沿 $\pm T_0$ 处引起次峰, 且激光的信噪比为 $4/a^2$.

假定光脉冲强度进行了归一化的啁啾信号光为线性分布, 即

$$U_0(t) = \exp \left[-\frac{(1+jC)t^2}{2T^2} \right], \quad (3)$$

式中, C 为啁啾系数, T 为啁啾脉冲半极大全宽值, 将 (3) 式代入 (2) 式, 得到光谱调制的啁啾脉冲分布为

$$U(t) = \exp \left[-\frac{(1+jC)t^2}{2T^2} \right] + \frac{a}{2} \exp \left[-\frac{(1+jC)(t+T_0)^2}{2T^2} \right] + \frac{a}{2} \exp \left[-\frac{(1+jC)(t-T_0)^2}{2T^2} \right]. \quad (4)$$

为分析光谱调制啁啾脉冲的时频谱, 对 (4) 式进行短时傅里叶变换. 短时傅里叶变换为

$$U(\omega, t') = \int_R U(t) g_a(t-t') e^{-j\omega t} dt, \quad (5)$$

其中 $g_a(t-t')$ 为短时傅里叶变换的窗口函数, 其反演公式

$$U(t) = \frac{1}{2\pi} \int_R \int_R g_a(t-t') U(\omega, t') e^{j\omega t} dt' d\omega. \quad (6)$$

本文所采用的窗口函数为

$$g_a(t) = (\pi\sigma^2)^{-1/4} e^{-t^2/2\sigma^2}, \quad (7)$$

式中 σ 为窗口函数宽度.

根据短时傅里叶变换性质, 光谱调制啁啾脉冲的短时傅里叶变换形式可表达为

$$U(\omega, \tau) = U_0(\omega, \tau) + \frac{a}{2} U_0(\omega, \tau - T_0) \exp(j\omega T_0) + \frac{a}{2} U_0(\omega, \tau + T_0) \exp(-j\omega T_0). \quad (8)$$

根据 (8) 式, 可得光谱调制啁啾脉冲的时频谱为

$$|U(\omega, \tau)|^2 = |U_0(\omega, \tau)|^2 + \frac{a^2}{4} |U_0(\omega, \tau - T_0)|^2 + \frac{a^2}{4} |U_0(\omega, \tau + T_0)|^2, \quad (9)$$

其中

$$U_0(\omega, \tau) = \left(\frac{1}{\pi\sigma^2}\right)^{1/4} \frac{1}{\sqrt{2\left[\frac{(1+jC)}{2T^2} + \frac{1}{2\sigma^2}\right]}} \times \exp\left\{-\frac{\omega^2}{4\left[\frac{(1+jC)}{2T^2} + \frac{1}{2\sigma^2}\right]} + \frac{j\frac{\tau}{\sigma^2}\omega}{2\left[\frac{(1+jC)}{2T^2} + \frac{1}{2\sigma^2}\right]} + \frac{\left(\frac{\tau}{\sigma^2}\right)^2}{4\left[\frac{(1+jC)}{2T^2} + \frac{1}{2\sigma^2}\right]^2} - \frac{\tau^2}{2\sigma^2}\right\}. \quad (10)$$

可得啁啾信号光的时频谱

$$|U_0(\omega, \tau)|^2 = \frac{1}{8\sqrt{\pi}\sigma} \frac{\sigma^4 T^4}{(T^2 + \sigma^2)^2 + (CT)^2} \times \exp\left\{-\frac{2\sigma^2 T^2}{(T^2 + \sigma^2)^2 + (CT)^2} \times \left[(T^2 + \sigma^2)\left(\omega + \frac{C\tau}{T^2 + \sigma^2}\right)^2 + \frac{2C^2\sigma^2}{(T^2 + \sigma^2)^2 T^2} \tau^2\right]\right\}. \quad (11)$$

从 (11) 式可知, 啁啾信号光的时频谱 $|U_0(\omega, \tau)|^2$ 在时间和频谱域中均为高斯函数, 其时频谱如图 1 所示. 令 $\frac{\partial |U_0(\omega, \tau)|^2}{\partial \omega} = 0$, 则在 $\omega = -\frac{C\tau}{T^2 + \sigma^2}$ 时, $|U_0(\omega, \tau)|^2$ 为极大值.

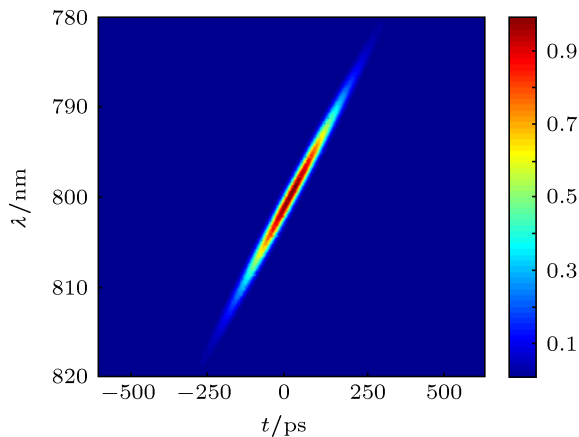


图 1 啁啾信号光 $U_0(t)$ 的时频谱

图 2 给出的是光谱调制脉冲的时频谱 $|U(\omega, \tau)|^2$ 示意图. 从该图可见, 预脉冲和后沿脉冲的时频谱等间距、平行地分布在啁啾信号光时频谱 $|U_0(\omega, \tau)|^2$ 两侧, 且其角频率差 $\Delta\omega = CT_0/T^2$.

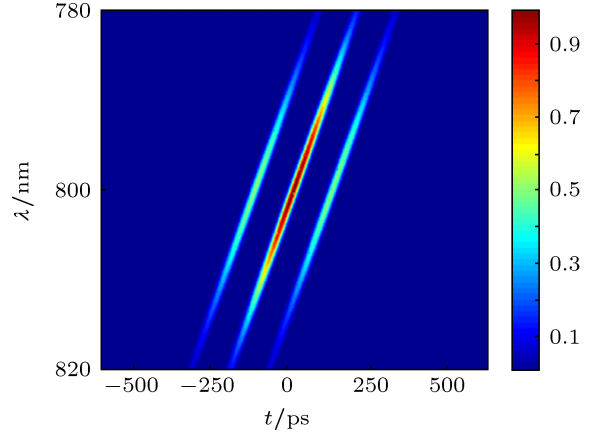


图 2 光谱调制啁啾脉冲 $U(t)$ 的时频谱示意图

2.2 光谱扫描滤波原理

根据光谱扫描滤波法提升飞秒激光的原理 [22-24], 在时间-频率域中, 在啁啾脉冲存续时间内, 滤波器的中心频率与啁啾信号光的中心频率相等, 因此, 在扫描滤波的过程中, 啁啾信号光能高效率通过, 从而将两侧分布的预脉冲和后沿脉冲的时频谱滤掉, 从而达到提升激光相干信噪比的目的.

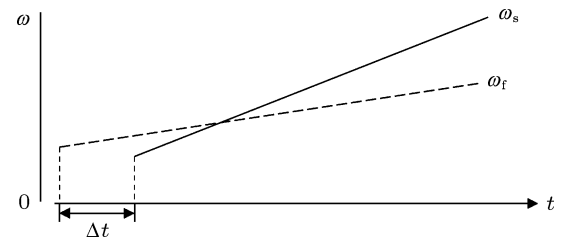


图 3 啁啾信号光和扫描滤波器的频率轨迹和扫描路径示意图

图 3 给出了在时间-频率坐标系中啁啾信号光频率轨迹和扫描滤波器扫描路径, 其中实线为啁啾信号光的频率轨迹, 虚线为扫描滤波器的扫描路径, 考虑到在实际的扫描滤波过程中, 扫描滤波器与信号光之间在时间上的不同步, 用 Δt 表示两者之间的“起始时间”不同, 即时间抖动.

采用法布里-珀罗干涉仪作为光谱扫描滤波器, 其透过率中心波长与施加的电压有关. 根据文献

[25] 和文献 [26], 其传输函数可表示为

$$\text{filter}(\delta\omega) = \frac{1}{\left(1 + \left(\frac{2F}{\pi}\right)^2 \sin^2 \left[\pi \frac{\omega - \omega_f(t)}{\Delta\omega_{\text{FSR}}}\right]\right)^{1/2}} \times \exp\{-j\phi_f(\omega)\}, \quad (12a)$$

$$\phi_f(\omega) = [\omega - \omega_f(t)] \frac{\Delta}{c} + a \tan \left\{ \frac{R \sin(2[\omega - \omega_f(t)]\Delta/c)}{1 - R \cos(2[\omega - \omega_f(t)]\Delta/c)} \right\}, \quad (12b)$$

式中 F 为 F-P 的精细度, $\Delta\omega_{\text{FSR}}$ 为自由光谱范围, Δ 为 F-P 腔的光程, c 为真空中的光速. 扫描滤波器的中心角频率 $\omega_f(t)$ 可表示为

$$\omega_f(t) = \omega_s(t) + \delta\omega(\Delta t) + \frac{pC}{T^2}t, \quad (13)$$

式中, $\delta\omega$ 来源于时间抖动 Δt , 故有 $\Delta t = T^2\delta\omega/C$; 参量 p 表示扫描滤波器与啁啾信号光的啁啾率之差. 从该式可见, 扫描滤波器的扫描率为 $(1+p)C/T^2$.

经过光谱扫描滤波器的扫描滤波后, 啁啾脉冲的时频函数为

$$\begin{aligned} U_f(\omega, t) &= U(\omega, t) \text{filter}(\omega, t) \\ &= \left[U_0(\omega, t) + \frac{a}{2} U_0(\omega, t - T) \exp(j\omega T_0) \right. \\ &\quad \left. + \frac{a}{2} U_0(\omega, t + T_0) \exp(-j\omega T_0) \right] \\ &\quad \times \text{filter}(\omega, t), \end{aligned} \quad (14)$$

式中, 右边的第一项、第二项和第三项分别是信号光、后沿脉冲和预脉冲引起的.

对上式进行短时傅里叶逆变换, 可得经过扫描滤波后的光场为

$$U_f(t) = U_{\text{of}}(t) + U_{\text{pre}}(t) + U_{\text{post}}(t), \quad (15)$$

其中

$$\begin{aligned} U_{\text{of}}(t) &= \frac{1}{2\pi} \int_R \int_R g_a(t-t') U_0(\omega, t') \text{filter}(\omega, t') \\ &\quad \times e^{j\omega t} dt' d\omega, \\ U_{\text{post}}(t) &= \frac{1}{2\pi} \int_R \int_R g_a(t-t') U_0(\omega, t' - T_0) \\ &\quad \times \exp(j\omega T_0) \text{filter}(\omega, t') e^{j\omega t} dt' d\omega, \\ U_{\text{pre}}(t) &= \frac{1}{2\pi} \int_R \int_R g_a(t-t') U_0(\omega, t' + T_0) \\ &\quad \times \exp(-j\omega T_0) \text{filter}(\omega, t') \\ &\quad \times e^{j\omega t} dt' d\omega. \end{aligned} \quad (16)$$

一般条件下, 上式无解析解, 需要进行数值求解. 由于需要扫描滤波后脉冲附加了位相, 在最后的脉冲压缩阶段, 需要考虑这些因素对压缩脉冲的影响, 在数值模拟阶段, 将给出压缩后脉冲 $U_c(t)$ 及压缩后的压缩信号光 $U_{\text{oc}}(t)$.

经过扫描滤波器的透过率为

$$\eta = \frac{\int_{-\tau/2}^{\tau/2} |U_{\text{of}}(t)|^2 dt}{\int_{-\tau/2}^{\tau/2} |U_0(t)|^2 dt}, \quad (17)$$

式中, τ 为啁啾信号光的存续时间.

3 数值分析与讨论

在数值分析部分, 相关参数如下: 啁啾信号光中心波长 $\lambda_0 = 800 \text{ nm}$ 、啁啾信号光的光谱范围 $780 \text{ nm} \leq \lambda_c \leq 820 \text{ nm}$, 其光谱带宽 $\Delta\lambda_c = 40 \text{ nm}$, 啁啾信号光的啁啾系数 C 为 1000, 脉冲宽度为 100 ps, 光谱调制周期 $T_0 = 740 \text{ ps}$, 啁啾信号光的存续时间 $\tau = 1 \text{ ns}$, 则可以得到扫描滤波器的啁啾率 $C_f = \Delta\lambda_c/\tau = 0.4 \text{ nm}/10 \text{ ps}$. 下面, 分别讨论光谱扫描滤波器的相关参数对系统信噪比的提升效果和啁啾信号光的透光率.

3.1 时间抖动的影响

图 4 给出的是时间抖动 Δt 对扫描滤波效果的影响, 其中 F-P 的自由光谱范围 $\Delta\lambda_{\text{FSR}} = 20 \text{ nm}$, 精细度 $F = 100$, 相应的扫描滤波器的通带宽度为 $0.2 \text{ nm} (= \Delta\lambda_{\text{FSR}}/F)$, 扫描斜率参量 $p = 0$; 时间抖动量 Δt 分别为 0, 1 ps 和 2 ps. 从图 4(a) 中可见, 受到光谱调制的啁啾脉冲经扫描滤波后, 有两个明显的特点. 其一, 在不同时间抖动量 Δt 情况下, 扫描滤波后的啁啾信号光的强度峰值降低、而脉宽变大, 如图 4(b) 所示; 其二, 信噪比的变化与时间抖动量变化关系不大, 经扫描滤波后, 啁啾信号光的信噪比提升了大概三个量级. 图 4(c) 给出的是经过扫描滤波后的啁啾信号光经过光栅对压缩后的压缩信号光脉冲, 从该图可见压缩脉冲的两个特点, 其一是预脉冲位置不变, 其二是预脉冲强度下降很明显, 而压缩信噪比提升量级同样达到 3 个量级以上. 图 4(d) 给出的是压缩信号光脉冲, 脉冲有一定的能量损耗, 脉冲宽度比输入脉冲的更大些; 系统的透过率分别达到 95%, 90% 和 79%.

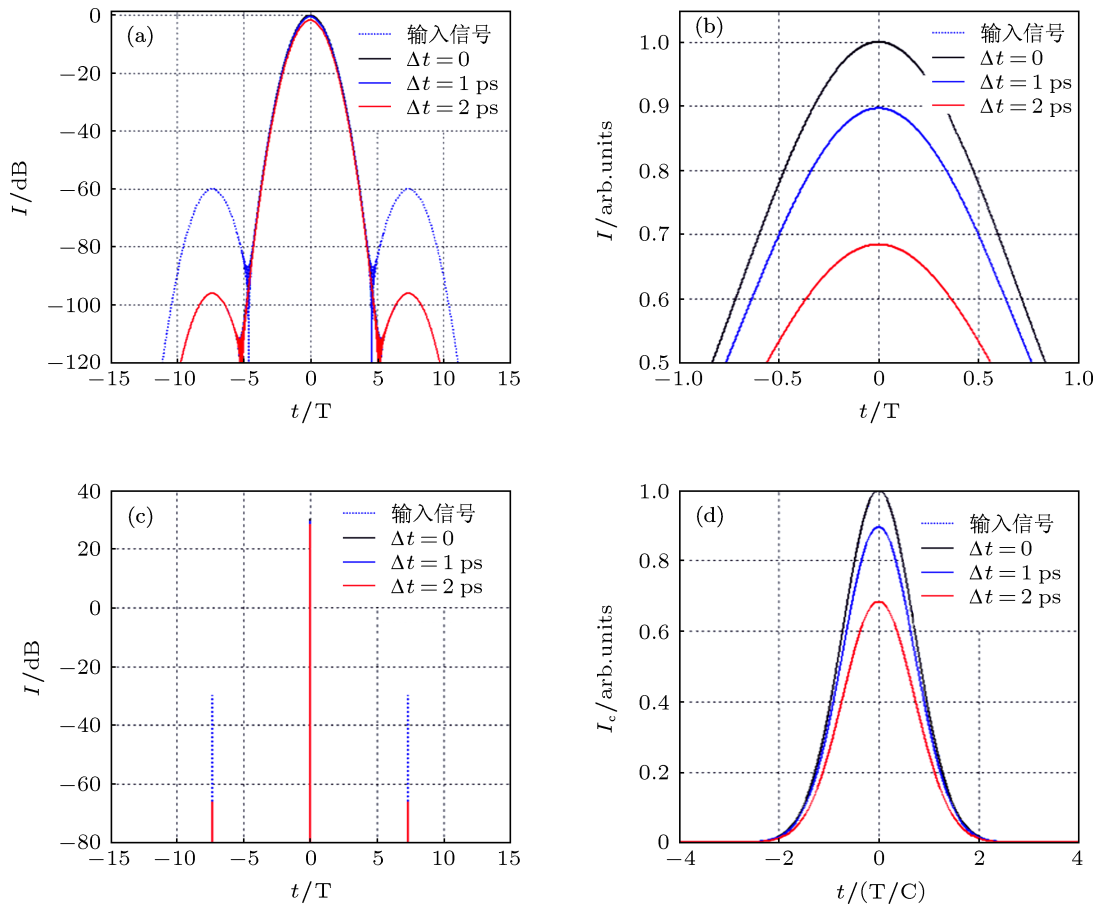


图4 扫描路径 $p = 0$, 时间抖动对啁啾脉冲和压缩信号光的影响 (a) 扫描滤波后的 $U_i(t)$ 强度; (b) 扫描滤波后的 $U_{of}(t)$ 强度; (c) 扫描滤波后的压缩脉冲 $U_c(t)$ 强度; (d) 扫描滤波后的压缩信号脉冲 $U_{oc}(t)$ 强度

3.2 扫描斜率参量 p 的影响

图5给出的是扫描斜率参量 p 对扫描滤波效果的影响, 其中 F-P 的自由光谱范围 $\Delta\lambda_{FSR} = 20 \text{ nm}$, 精细度 $F = 100$, 相应的扫描滤波器的通带宽度为 $0.2 \text{ nm} (= \Delta\lambda_{FSR}/F)$, 时间抖动 $\Delta t = 0$; 扫描速率参量 p 分别为 $0, 0.1$ 和 0.2 . 从图 5(a) 中可见, 受到光谱调制的光场经扫描滤波后, 其分布有两个明显的特点. 其一, 随着不同扫描速率变大, 啁啾信号光峰值强度基本不变; 但脉宽明显变小, 如图 5(b) 所示; 其二, 啁啾信噪比的变化与扫描速率不大, 经扫描滤波后, 啁啾信号光的信噪比提升了大概三个量级. 图 5(c) 给出的是经过扫描滤波后的信号光经过光栅对压缩后的压缩信号光脉冲, 从该图可见压缩脉冲的两个特点, 其一是预脉冲位置不变, 其二是信号光的信噪比提升达到为 3 个量级以上, 但预脉冲有明显的展宽, 这是因为附加了位相的原因, 见图 5(d). 图 5(e) 给出的是压缩信号光脉冲, 脉冲峰值将降低, 脉冲宽度变大. 以信噪比为 10^9 为例,

信号光本底将展宽到 20 ps 以外, 而光与物质相互作用过程中, 居于主脉冲 10 ps 以前的激光将产生激光, 从而隔断后续主激光与靶标物作用; 对扫描滤波后的信号进行补偿, 将极大改善压缩主脉冲的时间质量, 如图 5(f) 所示, 而系统的透过率分别达到 $85\%, 80\%$ 和 49% .

3.3 通带宽度的影响

图6给出的是扫描滤波器的通带宽度对扫描滤波效果的影响, 其中扫描斜率参量 $p = 0.1$, 时间抖动量 Δt 分别为 $0, F-P$ 的自由光谱范围 $\Delta\lambda_{FSR} = 20 \text{ nm}$, 精细度 $F = 100, 50$ 和 40 , 相应的扫描滤波器的通带宽度为 $0.2 \text{ nm} (= \Delta\lambda_{FSR}/F), 0.4 \text{ nm}$ 和 0.5 nm . 从图 6(a) 中可见, 受到光谱调制的光场经扫描滤波后, 其分布有两个明显的特点. 其一, 在不同工作通带宽度条件下, 啁啾光脉冲强度的强度基本不变; 但其脉宽随通带宽度的增加而增加, 如图 6(b) 所示; 其二, 啁啾光的信噪比随通带宽度的增大而变小, 其信噪比提升了大概三个量级. 图 6(c)

给出的是经过扫描滤波后的信号光经过光栅对压缩后的压缩光脉冲, 从该图可见压缩脉冲的两个特点, 其一是预脉冲位置不变, 其二是预脉冲强度下

降很明显, 信噪比提升量级同样达到 3 个量级以上. 图 4(d) 给出的是压缩信号光脉冲, 脉冲有一定的能量损耗; 系统的透过率分别达到 75%, 68%和 40%.

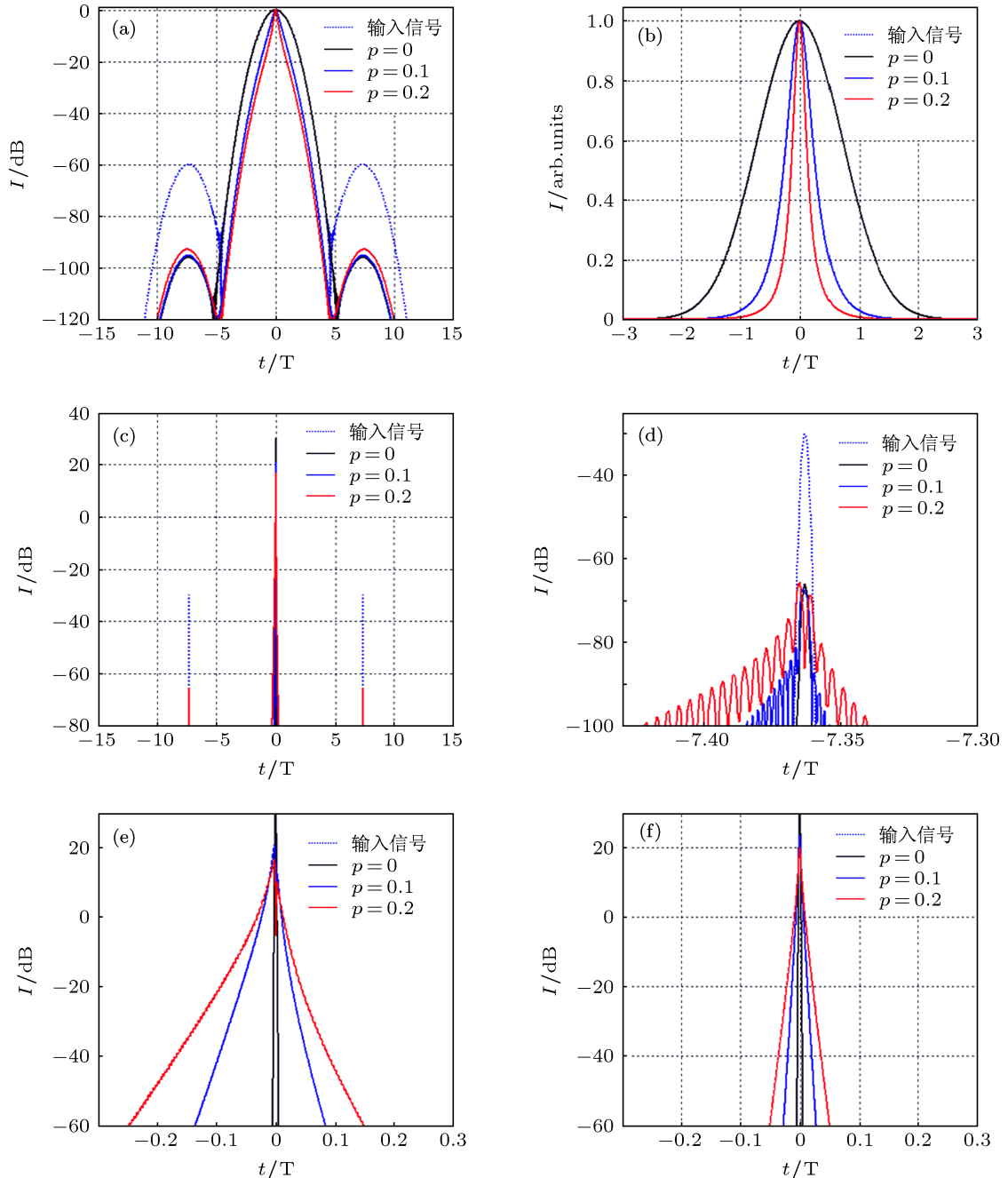


图 5 同步抖动为 0, 扫描斜率参数 p 相异条件下的啁啾信号脉冲经扫描滤波后的波形 (a) 扫描滤波后的 $U_i(t)$ 强度; (b) 扫描滤波后的 $U_{of}(t)$ 强度; (c) 扫描滤波后的压缩脉冲 $U_c(t)$ 强度; (d) 扫描滤波后的压缩信号预脉冲 $U_c(t+T_0)$ 强度; (e) 扫描滤波后的压缩信号脉冲 $U_{oc}(t)$ 强度; (f) 位相补偿后的压缩信号脉冲 $U_{oc}(t)$ 强度

3.4 效率分析

对扫描滤波器而言, 信号光能透过扫描滤波器的效率是很重要的指标, 从 (11) 式和 (12) 式可对其

进行计算. 图 7 给出的是时间抖动 Δt 对扫描滤波透过率的影响, 时间抖动越小和自由光谱范围越宽, 则透过率越高; 在 $\omega_f = \omega_s$ 的条件下, 扫描滤波器通带宽度为 0.5 nm 条件下, 其透过率接近 100%.

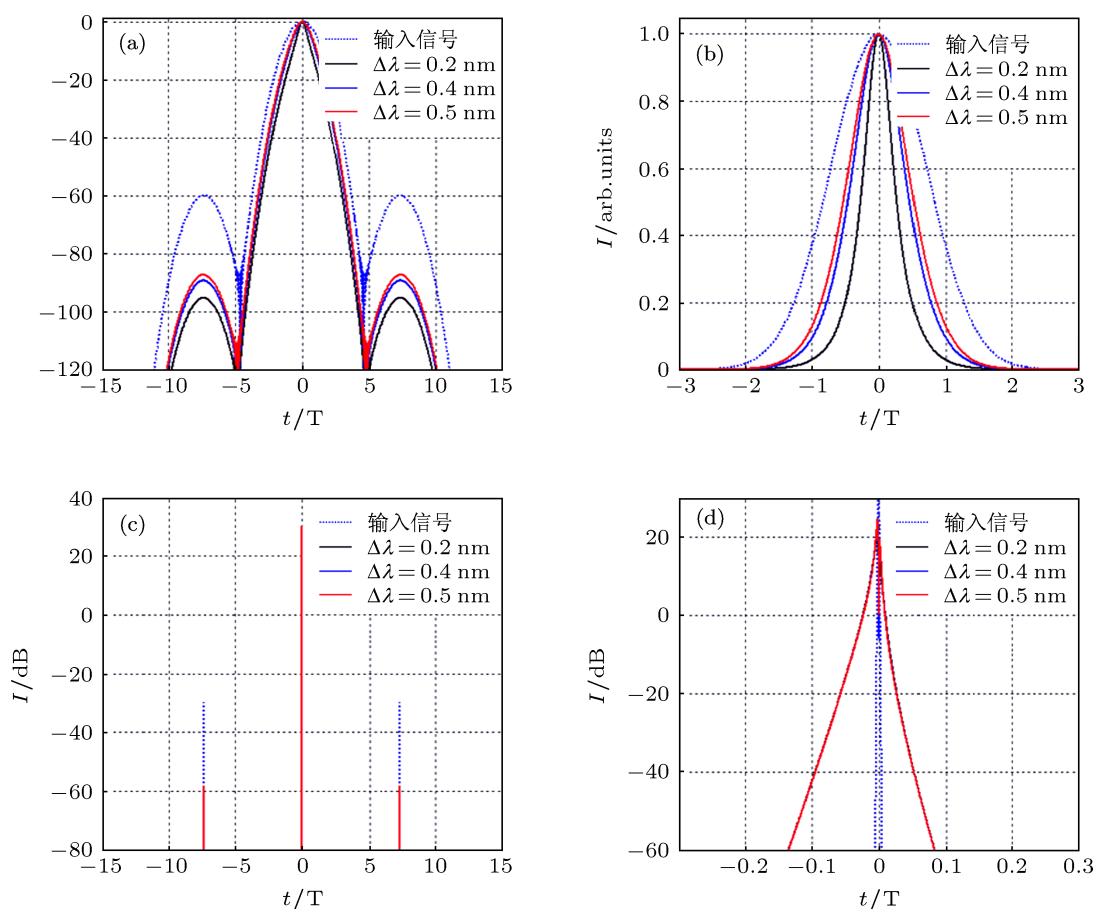


图6 同步抖动为0,扫描路径为0.1条件下,通带宽度对扫描滤波效果分析 (a)扫描滤波后的 $U_f(t)$ 强度; (b)扫描滤波后的 $U_{of}(t)$ 强度; (c)扫描滤波后的压缩脉冲 $U_c(t)$ 强度; (d)扫描滤波后的压缩信号脉冲 $U_{oc}(t)$ 强度

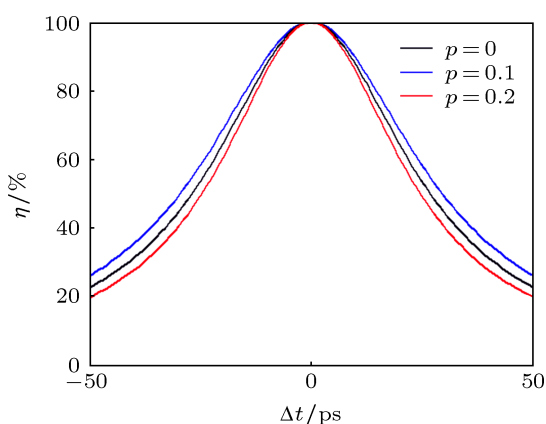


图7 扫描滤波器的透过率

4 结论

采用短时傅里叶变换的方法,对光谱调制脉冲在时间-频率域中进行了分析,从其解析表达式(或其时频谱图)中,可知在啁啾信号光的两侧,等间

隔、平行的分布着来源于预脉冲和后沿脉冲的时频谱.利用其时频谱图的特点,提出采用光谱扫描滤波器来抑制来源于预脉冲和后沿脉冲的时频谱,而将啁啾信号光脉冲高效率通过,从而提升信噪比.以F-P作为光谱扫描滤波器,控制施加在F-P电压,使其透过率的中心频率与信号光频率相等,从而实现光谱扫描.

比较图4(a),5(a)和6(a),可知扫描滤波在提升相干信噪比方面有两个特点,其一是啁啾脉冲的信噪比提升的倍数基本相同,在三个量级以上;其二是预脉冲位置不改变.在预脉冲与主脉冲相隔较远条件下,对(15)式求时间平均,可得

$$\langle U_f(t)^2 \rangle = \langle U_{of}(t)^2 \rangle + \langle U_{pre}(t)^2 \rangle + \langle U_{post}(t)^2 \rangle.$$

在扫描路径与啁啾信号光完全重合的情况下,选择合适的通带宽度和自由光谱范围,使 $U_f(t)$ 以极大值通过,而使 $U_{pre}(t)$ 与 $U_{post}(t)$ 以极小值通过,

完成扫描滤波, 其对比度提升比率为

$$R = \frac{\left\{ 1 + \left(\frac{2F}{\pi} \right)^2 \sin^2 \left(\pi \frac{\omega_s(t) + \Delta\omega - \omega_f(t)}{\Delta\omega_{\text{FSR}}} \right) \right\}}{\left\{ 1 + \left(\frac{2F}{\pi} \right)^2 \sin^2 \left(\pi \frac{\omega_s(t) - \omega_f(t)}{\Delta\omega_{\text{FSR}}} \right) \right\}}, \quad (18)$$

其中 $\Delta\omega$ 为预脉冲与主脉冲之间的角频率差, $\Delta\omega = CT_0/T^2$, 可见, 在时间完全同步的情况下, 可得到信噪比的提升率

$$R = 1 + \left(\frac{2F}{\pi} \right)^2 \sin^2 \left(\pi \frac{\Delta\omega}{\Delta\omega_{\text{FSR}}} \right). \quad (19)$$

经过扫描滤波后, 当 $\Delta\omega = \frac{2k+1}{2}\Delta\omega_{\text{FSR}}, k \in \mathbb{Z}$ 即

$$\omega_s(t) + \Delta\omega - \omega_f(t) = \frac{2k+1}{2}\Delta\omega_{\text{FSR}},$$

其信噪比的最大提升率 $R = 0.41F^2$, 见图 8. 本文选择光谱调制的周期为 740 ps, 它所形成的预脉冲的前沿, 处在 -10 ns 到 10 ps 位置之间, 因此具有一定的代表性, 表明扫描滤波法的确能提升飞秒激光信噪比, 另外, 据图 8 可知, 当光谱调制所

形成的时频谱图与主脉冲的时频谱的间隔 $\Delta\omega$ 在 $\frac{2k+1}{2}\Delta\omega_{\text{FSR}}$ 附近时, 也能获得较好的滤波效果.

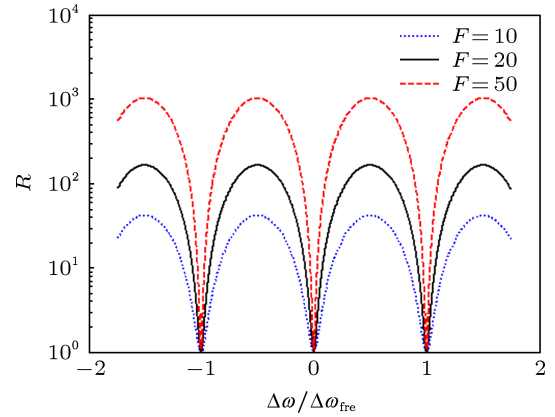


图 8 扫描滤波后, 相干信噪比的提升率

总之, 论文研究了扫描滤波技术对相干信噪比的提升率和信号光的透过率进行详细的研究, 其信噪比提升率可达 3 个量级, 透过率能达 90% 以上, 因此可以级联使用该技术进一步提升飞秒激光信噪比.

[1] Strickland D, Mourou G 1985 *Opt Commun.* **56** 219

[2] Bahk S W, Rousseau P, Planchon T A, Chvykov V, Kalintchenko G, Maksimchuk A, Mourou G A, Yanovsky V 2004 *Opt. Lett.* **29** 2837

[3] Deanna M P, Michael D P, Brent C S, Robert D B, Jerald A B, Curtis G B, Steve M H, John L M, Hoang T N, Bruce W S, Gregory L T, Victor P Y 1999 *Opt. Lett.* **24** 160

[4] Mourou G A, Tajima T, Bulanov S V 2006 *Reviews of Modern Physics* **78** 309

[5] Zuegel J D, Borneis S, Barty C, LeGarrec B, Danson C, Miyanaga N, Rambo P K, LeBlanc C, Kessler T J, Schmid A W, Waxer L J, Kelly J H, Kruschwitz B, Jungquist R, Moses E, Britten J, Jovanovic I, Dawson J, Blanchot N 2006 *Fusion Science and Technology* **49** 453

[6] Lévy A, Ceccotti T, D'Oliveira P, Réau F, Perdrix M, Quéré F, Monet P, Bougeard M, Lagadec H, Martin P, Geindre J P, Audebert P 2007 *Opt. Lett.* **32** 310

[7] Renault A, Frédérique A R, Thomas P, Oliveirab P D, Augusteb T, Chériaux G, Chambaret J P 2005 *Opt. Comm.* **248** 535

[8] Jullien A, Albert O, Burgy F, Hamoniaux G, Rousseau J P, Chambaret J P, Rochereau F A, Chériaux G, Etchepare J, Minkovski N, Saltiel S M 2005 *Opt. Lett.* **30** 920

[9] Chvykov V, Rousseau P, Reed S, Kalinchenko G, Yanovsky V 2006 *Opt. Lett.* **31** 1456

[10] Liu J, Okamura K, Kida Y, Takayoshi 2010 *Opt. Exp.* **18** 22245

[11] Liang S G, Liu H J, Huang N, Sun Q B, Wang Y S, Zhao W 2012 *Opt. Lett.* **37** 241

[12] Kiriyama H, Mori M, Nakai Y, Shimomura T, Tanoue M, Akutsu A, Kondo S, Kanazawa S, Okada H, Motomura T, Daido H, Kimura T, Tajima T 2010 *Appl. Opt.* **49** 2105

[13] Wang Z, Liu C, Shen Z, Zhang Q, Teng H, Z Wei 2011 *Opt. Lett.* **36** 3194

[14] Kiriyama H, Shimomura T, Sasao H, Nakai Y, Tanoue M, Kondo S, Kanazawa S, Pirozhkov A S, Mori M, Fukuda Y, Nishiuchi M, Kando M, Bulanov S V, Nagashima K, Yamagiwa M, Kondo K, Sugiyama A, Bolton P R, Tajima T, Miyanaga N 2012 *Opt. Lett.* **37** 363

[15] Ross I N, Matousek P, Towrie M, Langley A J, Collier J L 1997 *Opt. Comm.* **144** 125

[16] Yoshida H, Ishii E, Kodama R, Fujita H, Kitagawa Y, Izawa Y, Yamanaka T 2003 *Opt. Lett.* **28** 257

[17] Li W C, Wang Z H, Liu C, Teng H, Wei Z Y 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 124210 (in Chinese) [李伟昌, 王兆华, 刘成, 滕浩, 魏志义 2011 物理学报 **60** 124210]

[18] Liu C, Wang Z H, Li W C, Liu F, Wei Z Y 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 7036 (in Chinese) [刘成, 王兆华, 李伟昌, 刘峰, 魏志义 2010 物理学报 **59** 7036]

[19] Zeng S, Zhang B, Dan Y, Li X, Sun N, Sui Z 2010 *Opt. Comm.* **283** 4054

[20] Huang Y, Zhang C, Xu Y, Li D, Leng Y, Li R, Xu Z 2011 *Opt. Lett.* **36** 781

[21] Huang Y, Li Y, Wang J, Lu X, Leng Y, Li R X, Xu Z Z 2012 *J. Q. E. IEEE* **48** 516

[22] Ma Z, Sui Z, Feng G, Sun N, Wang Y, Zhang B, Chen J 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 074206 (in Chinese) [马再如, 隋展, 冯国英, 孙年春, 王屹山, 张彬, 陈建国 2012 物理学报 **61** 074206]

[23] Ma Z, Sui Z, Feng G, Sun N, Wang Y, Zhang B 2012 *Opt. Comm.* **285** 2883

[24] Ma Z, Li S 2012 *Journal of Optics* **14** 075202

[25] Xiao Y Z, Maywar D N, Agrawal G P 2011 *JOSAB* **28** 1685

[26] Yu J, Yuan S, Gao J Y, Sun L Z 2001 *JOSAA* **18** 2153

Theoretical analysis of scanning spectral filter method for coherent intensity contrast enhancement in femtosecond laser system*

Ma Zai-Ru¹⁾ Sui Zhan^{2)†} Zhou Gui-Yong¹⁾ Sun Nian-Chun³⁾ Wang Yi-Shan⁴⁾
Wang Xiang-Ling⁴⁾ Zhang Bin²⁾ Zhang Rong-Zhu³⁾

1) (College of Physics and Chemistry, Xihua University, Chengdu 610064, China)

2) (Research Center of Laser Fusion CAEP, Mianyang 621900, China)

3) (College of Electronics Information, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

4) (Xi'an Institute of Optics and precision Mechanics, state Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an 710119, China)

(Received 3 February 2013; revised manuscript received 9 April 2013)

Abstract

A scanning spectral filter method is proposed for improving the intensity contrast originating from the phase ripple in the femtosecond chains, which is made using the character that the instantaneous frequency varies with the time approximately linearly for the chirped pulse in the time-frequency domain. The scanning spectral filtering for reducing the pre-pulse and post-pulse intensity is analyzed in the time-frequency domain by using the short-time Fourier transformation method. Results show that the coherent intensity pulse contrast can be improved by $0.41F^2$ for the chirped pulse or the compressed pulse, and the transmission efficiency of the chirped pulse can exceed 90% when the synchronizing time of the jitter ranges from -2 ps to 2 ps and the chirp rate p from $0.9 C/T^2$ to $1.1C/T^2$.

Keywords: ultrafast optics, coherent pulse contrast, spectral scanning filtering, short time Fourier transformation

PACS: 42.60.Rn, 42.65.Re

DOI: 10.7498/aps.62.154202

* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2011AA1509), and the Key Fund of Sichuan Provincial Department of Education, China (Grant No. 2233443).

† Corresponding author. E-mail: suizhan2011@yahoo.com.cn