

利用相关技术测量激光脉冲的对比度

王益民 韩申生 张正泉 徐至展

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘 要 研究了在放大激光脉冲的噪声测量中, 二阶相关技术和三阶相关技术的差别。理论分析显示, 三阶相关技术不仅可以显示噪声脉冲的正确位置, 而且具有比二阶相关技术更高的测量精度, 数值计算也验证了这一点。

关键词 相关测量, 对比度。

1 引 言

在研究高密度等离子体物理及超快 X 射线发射的过程中, 高功率的超短强激光脉冲一直是一个重要的手段^[1, 2]。特别是在近年来, 亚皮秒的啁啾脉冲放大系统已将激光脉冲的能量放大了百毫焦的量级, 聚焦强度可达到 10^{20} W/cm^2 ^[3], 这么高的激光强度在实际应用过程中对于激光脉冲的时间形状要求是比较严格的, 特别是要求激光脉冲的对比度要达到一定的水平, 所以如何准确测量激光脉冲的对比度成为一个重要的问题。

激光脉冲的对比度一般用激光脉冲主脉冲的峰值功率与噪声脉冲的峰值功率的比来表示。条纹相机是超短脉冲测量中的一种常用工具, 但由于其动态范围较小, 不适合于激光脉冲对比度的测量。为此人们采用了相关技术^[4, 5], 这其中包括二阶相关方法和三阶相关方法。本文对这两种相关方法进行了比较研究, 分析了这两种方法各自所能达到的测量精度。理论分析显示, 三阶相关技术不仅可以显示出噪声脉冲的准确位置, 而且比二阶相关方法具有更高的精确度。

一般情况下, 在放大的激光脉冲的背景信号中, 存在着一个强度比较大的噪声脉冲, 它的存在对于物理实验的结果会产生不利的影响。这里采用高斯脉冲近似, 即假定放大后的激光主脉冲的时间形状和噪声脉冲的时间形状都为高斯形, 则放大脉冲的时间函数可表示为:

$$I(t) = I_m \exp(-t^2/a) + I_p \exp[-(t+T)^2/b] \quad (1)$$

式中 I_m 和 I_p 分别为主脉冲和噪声脉冲的峰值功率, a 和 b 与两个脉冲的宽度有关, 若设主脉冲和噪声脉的时间宽度(FWHM)分别为 Δt_m 和 Δt_p , 则 $a = \Delta t_m^2/(4 \ln 2)$, $b = \Delta t_p^2/(4 \ln 2)$; T 是两个脉冲之间的时间间隔。方程(1)表示, 在主脉冲的前面时间 T 处, 存在有一个峰值功率为 I_p 的本底脉冲, 放大脉冲的对比度为 $R_0 = I_m/I_p$ 。下面对方程(1)所表示的脉冲的相关特性进行讨论。

2 三阶相关函数

函数 $I(t)$ 的三阶相关函数可表示为:

$$I_c(\tau) = \int I(t) I^2(t - \tau) dt \quad (2)$$

式中 τ 为 $I^2(t)$ 与 $I(t)$ 之间的时间延迟。将方程(1)代入(2)式中, 经过积分运算可得:

$$I_c(\tau) = I_1(\tau) + I_2(\tau) + I_3(\tau) + I_4(\tau) + I_5(\tau) + I_6(\tau) \quad (3)$$

其中:

$$\begin{aligned} I_1(\tau) &= \sqrt{\frac{\pi a}{3}} I_m^3 \exp\left(-\frac{2}{3a}\tau^2\right), & I_2(\tau) &= \sqrt{\frac{\pi ab}{a+2b}} I_m^2 I_p \exp\left[-\frac{2}{a+2b}(\tau+T)^2\right] \\ I_3(\tau) &= 2 \sqrt{\frac{\pi ab}{a+2b}} I_m^2 I_p \exp\left(-\frac{\tau^2}{2a}\right) \exp\left[-\frac{(\tau-2T)^2}{2(a+2b)}\right], \\ I_4(\tau) &= 2 \sqrt{\frac{\pi ab}{a+2b}} I_m I_p^2 \exp\left(-\frac{\tau^2}{2b}\right) \exp\left[-\frac{(\tau+2T)^2}{2(b+2a)}\right] \\ I_5(\tau) &= I_m I_p^2 \sqrt{\frac{\pi ab}{b+2a}} \exp\left[-2\frac{(\tau-T)^2}{b+2a}\right], & I_6(\tau) &= I_p^3 \sqrt{\frac{\pi b}{3}} \exp\left(-\frac{2}{3b}\tau^2\right) \end{aligned} \quad (4)$$

尽管在 $I_c(\tau)$ 的展开式中有六项, 但在实际情况下可以对其进行化简。由于所测量的噪声脉冲的幅度远小于主脉冲的幅度, 因此展开式中所包含的 I_p 的高阶项可以忽略, 再看 $I_3(\tau)$, 它是一个交叉项, 表示相距为 $2T$ 的两个脉冲的乘积, 一般两个脉冲的宽度远小于 $2T$, 因此这一项也可忽略为零。所以在 $I_c(\tau)$ 的展开式中实际上只剩下两项, $I(t)$ 的三阶相关函数可表示为:

$$I_c(\tau) = I_1(\tau) + I_2(\tau) = \sqrt{\frac{\pi a}{3}} I_m^3 \exp\left(-\frac{2}{3a}\tau^2\right) + \sqrt{\frac{\pi ab}{a+2b}} I_m^2 I_p \exp\left[-\frac{2}{a+2b}(\tau+T)^2\right] \quad (5)$$

方程(5)显示, 在 $\tau=0$ 和 $\tau=-T$ 处分别有一激光脉冲, 其对比度为:

$$R_3 = \sqrt{\frac{\pi a}{3}} I_m^3 / \left(\sqrt{\frac{\pi ab}{a+2b}} I_m^2 I_p \right) = \sqrt{\frac{2}{3} + \frac{a}{3b} \frac{I_m}{I_p}} \quad (6)$$

将(1)的关系式代入上式中, 得:

$$R_3 = \sqrt{\frac{2}{3} + \frac{1}{3} \left(\frac{\Delta t_m}{\Delta t_p} \right)^2} R_0 \quad (7)$$

3 二阶相关函数

函数 $I(t)$ 的二阶相关函数表示为:

$$I_a(\tau) = \int I(t) I(t - \tau) dt \quad (8)$$

式中 τ 为 $I(t)$ 与 $I(t)$ 之间的时间延迟, 将(1)式代入(8)式, 利用与前面类似的讨论方法, 可得到:

$$I_a(\tau) = \sqrt{\frac{\pi a}{2}} I_m^2 \exp\left(-\frac{\tau^2}{2a}\right) + \sqrt{\frac{\pi ab}{a+b}} I_m I_p \exp\left[-\frac{(\tau-T)^2}{a+b}\right] + \sqrt{\frac{\pi ab}{a+b}} I_m I_p \exp\left[-\frac{(\tau+T)^2}{a+b}\right] \quad (9)$$

(9) 式显示, 除了在 $\tau = 0$ 处有一个主脉冲外, 在 $\tau = T$ 和 $\tau = -T$ 处还有峰值功率相同的两个辅脉冲; 因其峰值功率相同, 所以任取一个来表示脉冲的对比度, 得到:

$$R_2 = \sqrt{\frac{\pi a}{2}} / \left(\sqrt{\frac{\pi a b}{a+b}} I_m I_p \right) = \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \left(\frac{a}{b} \right) \left(\frac{I_m}{I_p} \right)} \quad (10)$$

将(1)式代入(10)式中, 可得到用二阶相关测量所得到的脉冲对比度的表达式为:

$$R_2 = \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta t_m}{\Delta t_p} \right)^2} R_0 \quad (11)$$

下面对以上关系进行讨论。当 $\Delta t_m = \Delta t_p$, 即主脉冲与噪声脉冲的宽度相等时, 由(7)式和(11)式可得, $R_3 = R_2 = R_0$, 因此二阶和三阶相关函数都能正确反映原激光脉冲的对比度。但在实际情况下, 放大激光脉冲的主脉冲宽度远小于噪声脉冲的宽度, 有 $\Delta t_m \ll \Delta t_p$, 所以(7)式和(11)式可改写为:

$$R_3 = \sqrt{2/3} R_0 \approx 0.8R_0, \quad R_2 = \sqrt{1/2} R_0 \approx 0.7R_0$$

从上式可以看出, 利用相关方法测量出来的激光脉冲对比度的值要小于实际值。因为 $R_2 < R_3$, 所以在实际的激光脉冲对比度的测量中, 三阶相关方法的测量精度要高于二阶相关方法。在图 1 中, 利用(7)式和(11)式, 分别计算了 R_3/R_0 , R_2/R_0 随 $\Delta t_m/\Delta t_p$ 的变化关系曲线, 其中实线为 R_3/R_0 , 虚线为 R_2/R_0 。从图上显示出了 $R_2 < R_3$ 这一情况, 表明 R_3 具有更高的精确度。为了提高激光脉冲的对比度, 人们需要知道噪声脉冲的正确位置。将(5)式和(9)式分别与(1)式比较可以看出, 三阶相关方法显示出了噪声脉冲的正确位置, 而二阶相关方法则由于二阶相关函数的对称性而无法作到这一点。在图 2 中, 利用(2)式和(8)式直接计算了脉冲(1)的归一化的二阶和三阶相关函数, 其中主脉冲和噪声脉冲的宽度分别为 $\Delta t_m = 1$ ps, $\Delta t_p = 20$ ps, 它们之间间隔为 $T = 100$ ps。图中, 实线为输入激光脉冲的时间形状, 虚线为它的三阶归一化相关函数, 点线为它的二阶归一化相关函数。由图上可以看出, 三阶相函数不仅显示出了噪声脉冲的正确位置, 而且更接近真实的输入脉冲的时间形状。在实际测量中, 二阶相关方法用普通的自相关器就可作到, 实现起来比较简单, 而三阶相关测量则要复杂一些, 需要用到三阶相关器。

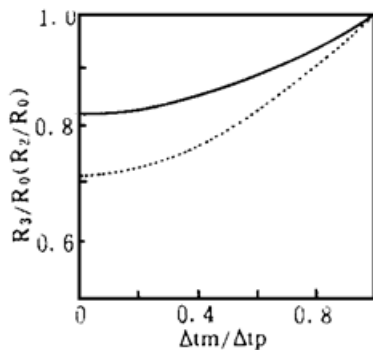


Fig. 1 Behavior of R_3/R_0 and R_2/R_0 as functions of $\Delta t_m/\Delta t_p$. The solid line represents the behavior of R_3/R_0 , and the dashed line represents the behavior of R_2/R_0 . It shows that R_3 is more accurate than R_2 .

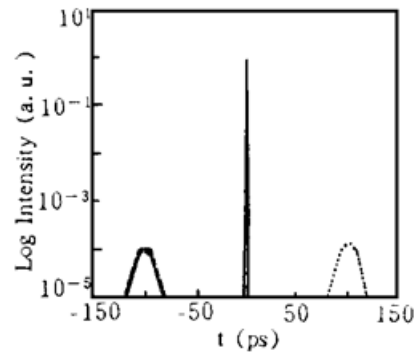


Fig. 2 Correlation curve of a amplified laser pulse. The parameters are: $\Delta t_m = 1$ ps, $\Delta t_p = 20$ ps, $T = 100$ ps, $R_0 = 10^4$. The solid curve represents the normalized laser pulse. The dashed line is its normalized third order correlation curve, and the dot line is its normalized autocorrelation curve

本文分析比较了二阶相关方法和三阶相关方法在放大激光脉冲对比度测量中的不同之处。给出了定量的分析结果, 并进行了数值计算。分析显示, 三阶相关方法不仅可以测量出噪声脉冲的准确位置, 而且具有比二阶相关方法更高的测量精度。

参 考 文 献

- [1] M. M. Murnane, H. C. Kapteyn, R. W. Falcone, High-density plasmas produced by ultrafast laser pulses. *Phys. Rev. Lett.*, 1989, **62**(2) : 155~ 158
- [2] O. L. Landen, E. M. Campbell, M. D. Perry, X-ray characterization of picosecond laser plasmas. *Opt. Commun.*, 1987, **63**(4) : 253~ 258
- [3] C. P. J. Barty, C. L. Gordonand, B. E. Lemoff, Multiterawatt 30-fs Ti:sapphire laser system. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(18) : 1442~ 1444
- [4] A. Braun, J. V. Rudd, H. Cheng *et al.*, Characterization of short-pulse oscillators by means of a high-dynamic-range autocorrelation measurement. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(18) : 1889~ 1891
- [5] G. Albrecht, A. Antonetti, G. Mourou, Temporal shape analysis of Nd³⁺ :YAG active passive mode-locked pulses. *Opt. Commun.*, 1981, **40**(1) : 59~ 62

Contrast Ratio Measurement of Laser Pulses Using Correlation Technology

Wang Yimin Han Shensheng Zhang Zhengquan Xu Zhizhan

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

(Received 24 May 1996; revised 26 June 1996)

Abstract The differences between autocorrelation and triple-correlation are studied in contrast ratio measurement of amplified laser pulses. Theoretical analysis shows that triple-correlation can not only locate the right position of the noise pulse, but also has higher accuracy than autocorrelation. These results are verified by numerical calculation.

Key words correlation measurement, contrast ratio.