

文章编号: 0258-7025(2007)07-0908-07

# 超高斯光脉冲自相关特性

郑宏军<sup>1,2</sup>, 刘山亮<sup>1</sup>, 黎 昕<sup>1</sup>, 徐静平<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 聊城大学光通信研究所, 山东 聊城 252059; <sup>2</sup> 华中科技大学电子科学与技术系, 湖北 武汉 430074)

**摘要** 采用数值分析方法研究了超高斯光脉冲的自相关特性及其受锐度参量、线性啁啾参量、噪声脉冲和随机噪声影响的变化规律, 并与原脉冲相应参量作了比较, 给出了一个有效的滤除随机噪声方法, 并用实验作了验证。当锐度参量增加时, 强度自相关曲线宽度变窄, 自相关频谱曲线随之展宽。当啁啾参量增大时, 光脉冲强度自相关曲线和脉冲时域波均保持不变; 光脉冲的频谱曲线展宽, 边缘出现振荡结构并随之增强, 自相关频谱曲线随之展宽, 边缘依旧平滑。存在噪声的情况下, 超高斯脉冲自相关特性变化比较复杂。

**关键词** 激光物理; 自相关频谱; 强度自相关; 时间带宽积; 超高斯光脉冲

**中图分类号** TN 247 **文献标识码** A

## Autocorrelation Characteristics of Super-Gaussian Optical Pulse

ZHENG Hong-jun<sup>1,2</sup>, LIU Shan-liang<sup>1</sup>, LI Xin<sup>1</sup>, XU Jing-ping<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Optical Communication, Liaocheng University, Liaocheng, Shandong 252059, China*  
<sup>2</sup>*Department of Electronic Science and Technology,  
Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China*

**Abstract** The autocorrelation characteristics of the super-Gaussian optical pulse and their variations with the edge sharpness parameter, linear chirp parameter, noise-pulse and random noise are investigated by use of numerical analysis method, and compared with the relevant parameters of the original pulse. A useful method of filtering random noise is given and validated by experiments. When the edge sharpness parameter increases, the curve of intensity autocorrelation becomes narrow, and the autocorrelation spectral curve broadens without chirp, noise-pulse and random noise. When the linear chirp parameter increases, the temporal waveform of the pulse and the curve of intensity autocorrelation keep unchanged; the curve of pulse spectra broadens and the oscillatory structures appear at its edges and increase; the autocorrelation spectral curve broadens and its edges are still smooth. The variation of pulse autocorrelation characteristics is complex when noise-pulse or random noise exists.

**Key words** laser physics; autocorrelation spectra; intensity autocorrelation; time-band width product; super-Gaussian optical pulse

## 1 引 言

近几年发展起来的频率分辨光学门(FROG)新型测量技术受到了科研人员的普遍关注<sup>[1~6]</sup>, 光脉冲自相关频谱和强度自相关参量是频率分辨光学门测量技术的重要参量, 是其进行脉冲测量时的监视窗口。研究这些参量的变化, 不但可以较早地预测被测脉冲的特性, 提高测量效率, 而且指导人们准确

测量脉冲特性。在强激光技术领域存在许多强度分布近似为平顶的光束, 可用超高斯光束描述<sup>[7,8]</sup>。在实际的光通信系统中光信号脉冲也接近于超高斯分布, 并且通常还带有一定的啁啾<sup>[9,10]</sup>; 因此对啁啾超高斯脉冲特性的研究很有必要, 然而, 目前对超高斯脉冲自相关频谱和强度自相关参量的研究却少见报道。考虑到实际激光脉冲源通常为具有较大频率

收稿日期: 2006-08-09; 收到修改稿日期: 2006-11-02

基金项目: 山东省教育厅科技计划重点项目(J05C09)和聊城大学科研基金资助课题。

作者简介: 郑宏军(1970—), 男, 山东人, 副教授, 博士研究生, 主要从事高速光纤通信等研究。E-mail: zhj@lcu.edu.cn

导师简介: 徐静平(1958—), 男, 湖北人, 教授, 博士, 博士生导师, 主要研究领域为光电子器件等。

E-mail: jpxu@mail.hust.edu.cn

啾啾且频率啾啾可以通过改变光源工作电流或改变传输光纤长度等进行调节<sup>[11~13]</sup>,本文给出了啾啾超高斯光脉冲的自相关特性及其受锐度参量  $m$ , 啾啾参量  $|C|$ , 噪声脉冲和随机噪声影响的变化规律, 与原脉冲相应参量作了比较, 并给出了一个有效滤除随机噪声的方法, 最后用实验作了验证。

## 2 光脉冲的自相关特性参量定义

由二次谐波-频率分辨光学门(SHG-FROG)脉冲分析仪技术原理可以得到光脉冲的无背景自相关特性参量的定义<sup>[2~6]</sup>。待测光脉冲与快门开关(延迟)光脉冲通过在倍频晶体中相互作用产生自相关光脉冲的电场为

$$E_G(t, \tau) = AE(t)E(t - \tau), \quad (1)$$

式中  $A$  为与倍频晶体有关的比例系数, 为简化计算取  $A = 1$ ;  $E(t)$  为待测光脉冲电场,  $E(t - \tau)$  为快门开关(延迟)光脉冲电场。由自相关光脉冲得到与时延  $\tau$  和频率  $\omega$  有关的二维函数

$$I_1(\omega, \tau) = |\tilde{E}_1(\omega, \tau)|^2 = \left| \int_{-\infty}^{\infty} E_G(t, \tau) \exp(i\omega t) dt \right|^2, \quad (2)$$

该函数的图形称为频率分辨光学门图。对频率分辨光学门图数据进行迭代运算即可恢复光脉冲的脉宽、谱宽、波形、相位和啾啾等特征信息。

将(2)式对频率  $\omega$  积分, 得

$$G(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} I_1(\omega, \tau) d\omega = \int_{-\infty}^{\infty} \left| \int_{-\infty}^{\infty} E_s(t, \tau) \exp(i\omega t) dt \right|^2 d\omega = \int_{-\infty}^{\infty} |E(t)|^2 |E(t - \tau)|^2 dt, \quad (3)$$

由(3)式可知, 由  $I_1(\omega, \tau)$  给出的自相关函数与由强度自相关测量仪给出的自相关函数完全相同。(3)式对应的曲线称为强度自相关曲线, 由(3)式可得到光脉冲的强度自相关半峰全宽  $\Delta t_G$ 。

将(2)式对时延  $\tau$  积分, 得

$$\int_{-\infty}^{\infty} I_1(\omega, \tau) d\tau = \int_{-\infty}^{\infty} |\tilde{E}_1(\omega, \tau)|^2 d\tau = \int_{-\infty}^{\infty} |\tilde{E}(\omega')|^2 |\tilde{E}(\omega' - \omega)|^2 d\omega' = G(\omega), \quad (4)$$

$G(\omega)$  称为自相关频谱函数, 其曲线称为自相关频谱曲线。由(4)式可得到光脉冲的自相关频谱半峰全宽  $\Delta\nu_G$ , 则光脉冲的自相关时间带宽积为  $\Delta t_G \cdot \Delta\nu_G$ 。由强度自相关、自相关频谱和自相关时间带宽积等信息可推知待测脉冲的有关特性。

## 3 超高斯光脉冲及其自相关特性计算

对线性啾啾超高斯光脉冲, 归一化包络电场可表示为

$$U(t) = \exp\left[-\frac{1+iC}{2}\left(\frac{t}{t_0}\right)^{2m}\right], \quad (-\infty < t < \infty) \quad (5)$$

式中  $t$  为时间,  $t_0$  是在  $e^{-1}$  强度处的脉冲半宽度;  $C$  为线性啾啾参量,  $m$  为脉冲前后沿的锐度参量;  $m = 1$ , 对应啾啾高斯脉冲情况;  $m$  越大, 脉冲前后沿锐度越大, 脉冲越接近方形脉冲或平顶脉冲。由(5)式得脉冲半峰全宽为

$$\Delta t = 2(\ln 2)^{\frac{1}{2m}} t_0, \quad (6)$$

文献[1]中高斯脉冲的脉冲半峰全宽  $\Delta t = 2\sqrt{\ln 2} t_0 = 1.6651 t_0$ , 是(6)式在  $m = 1$  时的特例。

(5)式所示线性啾啾超高斯光脉冲的频谱

$$U(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} U(t) \exp(i\omega t) dt = \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left[-\frac{1+iC}{2}\left(\frac{t}{t_0}\right)^{2m}\right] \exp(i\omega t) dt, \quad (7)$$

在  $m = 1$  时, 其频谱为  $U(\omega)_{m=1} = \sqrt{\frac{1}{1+iC}} t_0 \times \exp\left[-\frac{(1-iC)t_0^2\omega^2}{2(1+C^2)}\right]$ , 其半峰全宽为  $\Delta\nu = \sqrt{\ln 2(1+C^2)}/(\pi t_0)$ ; 则其时间带宽积为  $\Delta t \cdot \Delta\nu = 2\ln 2 \sqrt{1+C^2}/\pi$ 。

(5)式所示线性啾啾超高斯光脉冲的强度自相关函数

$$G(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} |U(t)|^2 |U(t - \tau)|^2 dt = \int_{-\infty}^{\infty} \left| \exp\left[-\frac{1+iC}{2}\left(\frac{t}{t_0}\right)^{2m}\right] \right|^2 \times \left| \exp\left[-\frac{1+iC}{2}\left(\frac{t-\tau}{t_0}\right)^{2m}\right] \right|^2 dt, \quad (8)$$

在  $m = 1$  时, 其强度自相关为  $G(\tau)_{m=1} = t_0 \sqrt{\pi} \times \exp\left(-\frac{\tau^2}{2t_0^2}\right)$ , 其半峰全宽为  $\Delta\tau_G = 2\sqrt{2\ln 2} t_0$ , 是相应高斯脉冲半峰全宽的  $\sqrt{2}$  倍。

(5)式所示线性啾啾超高斯光脉冲的自相关脉冲傅里叶变换

$$\tilde{U}_s(\omega, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} U(t)U(t - \tau) \exp(i\omega t) dt = \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left[-\frac{1+iC}{2}\left(\frac{t}{t_0}\right)^{2m}\right] \times \exp\left[-\frac{1+iC}{2}\left(\frac{t-\tau}{t_0}\right)^{2m}\right] \exp(i\omega t) dt, \quad (9)$$

(5)式所示线性啁啾超高斯光脉冲的自相关频谱函数

$$G(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} |\tilde{U}_s(\omega, \tau)|^2 d\tau = \int_{-\infty}^{\infty} \left| \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left[-\frac{1+iC}{2}\left(\frac{t}{t_0}\right)^{2m}\right] \times \exp\left[-\frac{1+iC}{2}\left(\frac{t-\tau}{t_0}\right)^{2m}\right] \exp(i\omega t) dt \right|^2 dt, \quad (10)$$

在  $m = 1$  时, 其自相关频谱为  $G(\omega)_{m=1} = \pi t_0^3 \times \exp\left[-\frac{t_0^2 \omega^2}{2(1+C^2)}\right]$ , 其半峰全宽为  $\Delta\nu_G = \sqrt{2\ln 2(1+C^2)}/(\pi t_0)$ , 是相应高斯脉冲频谱半峰全宽的  $\sqrt{2}$  倍; 则自相关时间带宽积为  $\Delta t_G \cdot \Delta\nu_G = 4\ln 2 \sqrt{1+C^2}/\pi$ , 是相应高斯脉冲时间带宽积的 2 倍。

(7) ~ (10) 式在  $m \neq 1$  时很难解析求解, 这里采用数值分析方法得到了超高斯光脉冲的自相关特性, 并与原脉冲相应参量作了比较。若无特殊说明, 数值计算采用时域窗口为  $(-40, 40)$ , 采样点数为 1024。

### 3.1 超高斯光脉冲的自相关曲线和自相关频谱曲线随 $m$ 和 $|C|$ 的变化

图 1 为  $m = 2, C = 0$  时超高斯光脉冲的时域波形及其强度自相关曲线, 横坐标是时间和时间延迟 (归一化到  $t_0$ , 对自相关曲线表示时延), 纵坐标是归一化强度。由图 1 可见, 光脉冲时域波形在  $t = 0$  附近非常平坦, 波形前后沿下降速度快; 光脉冲自相关曲线在  $t = 0$  附近比前者稍尖锐, 前后沿下降速度比前者缓慢; 光脉冲自相关曲线半峰全宽比光脉冲时域半峰全宽明显要宽。当锐度参量  $m$  增加时, 光脉

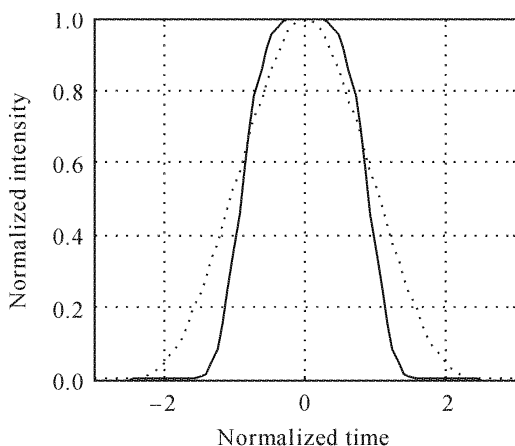


图 1  $m = 2, C = 0$  时超高斯光脉冲的时域波形 (实线) 及其强度自相关曲线 (点线)

Fig. 1 Temporal waveform (solid curve) and intensity autocorrelation (dotted curve) of super-Gaussian pulse for  $m = 2$  and  $C = 0$

冲强度自相关曲线边缘稍内缩, 半峰全宽稍窄, 与脉冲时域波形的平顶展宽, 前后沿下降加快不同。当啁啾参量  $|C|$  增加时, 光脉冲强度自相关曲线与脉冲时域波形均保持不变。

图 2 为  $m = 2, C = 0$  时超高斯光脉冲频谱曲线及其自相关频谱曲线, 横坐标是频率 (归一化到  $1/t_0$ )。由图 2 可见, 光脉冲频谱曲线及其自相关频谱曲线在  $t = 0$  附近几乎重合; 脉冲频谱曲线前后沿比自相关频谱曲线的下降速度快得多, 在脉冲频谱曲线边缘出现振荡结构, 而自相关频谱曲线边缘没有振荡结构; 光脉冲自相关频谱曲线宽度比光脉冲频谱曲线宽度稍宽。当锐度参量  $m$  和啁啾参量  $|C|$  分别增加时, 光脉冲的频谱曲线继续展宽, 边缘的振荡结构随之增大; 自相关频谱曲线亦随之展宽, 其边缘仍然较平滑。

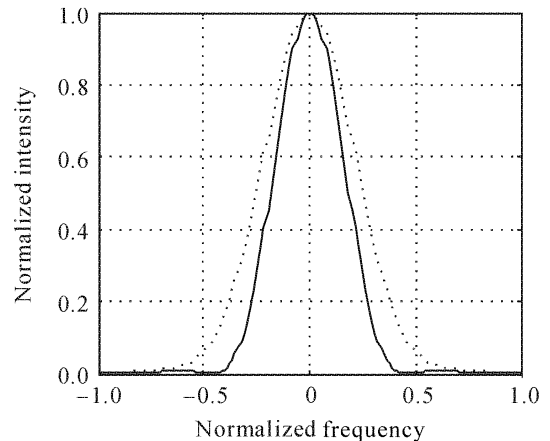


图 2  $m = 2, C = 0$  时超高斯光脉冲的频谱曲线 (实线) 及其自相关频谱曲线 (点线)

Fig. 2 Spectral curve (solid curve) and autocorrelation spectral curve (dotted curve) of super-Gaussian pulse for  $m = 2$  and  $C = 0$

表 1 为数值计算得到的超高斯脉冲及其自相关特性随  $m$  的变化, 分别给出了超高斯脉冲特性及其自相关特性的时域半峰全宽、频谱半峰全宽和时间带宽积。 $m = 1$  时, 数值计算得到的超高斯脉冲及其自相关特性参量与解析结果完全一致; 超高斯脉冲的时域半峰全宽、频谱半峰全宽和时间带宽积及其自相关频谱半峰全宽和自相关时间带宽积都随  $m$  的增大而增加, 增加速度逐渐减小; 自相关时域半峰全宽随之减小, 减小速度逐渐变缓。自相关特性参量与脉冲特性参量的比值随之减小且速度变缓。

### 3.2 噪声脉冲对超高斯光脉冲及其自相关特性影响

用二次谐波-频率分辨光学门脉冲分析仪研究光脉冲的传输特性时发现, 当存在较强的色散波噪

表 1 数值计算得到的超高斯脉冲及其自相关特性

Table 1 Calculated super-Gaussian pulse and autocorrelation characteristics (FWHM: full width at half maximum)

	Pulse characteristics			Autocorrelation characteristics		
	Temporal FWHM	Spectral FWHM	Time-band width product	Temporal FWHM	Spectral FWHM	Time-band width product
$m = 1, C = 0$	1.6651	0.2650	0.4413	2.3548	0.3748	0.8825
$m = 2, C = 0$	1.8249	0.3741	0.6827	2.1053	0.5053	1.0639
$m = 3, C = 0$	1.8815	0.4061	0.7641	2.058	0.5443	1.1201

声时,脉冲的自相关特性变化比较复杂。为了更深入地研究光脉冲自相关特性,在原超高斯光脉冲时域波形的边缘加入一个幅值较小的超高斯脉冲模拟色散波噪声,并通过数值计算给出了噪声脉冲对光脉冲及其自相关特性的影响规律。

包含噪声脉冲的线性啁啾超高斯光脉冲的归一化包络电场可表示为

$$U(t) = \exp\left[-\frac{1+iC}{2}\left(\frac{t}{t_0}\right)^{2m}\right] + a \exp\left[-\frac{1+iC}{2}\left(\frac{t-b}{t_0}\right)^{2m}\right], \quad (-\infty < t < \infty) \quad (11)$$

式中  $a$  为噪声脉冲幅值系数,  $b$  为超高斯光脉冲与噪声脉冲的时间间隔。(11)式所示脉冲的频谱及其自相关特性难于解析求解,这里用数值计算得到了其变化规律。

图 3 为  $m = 2, C = 0, a = 0.3$  和  $b = 3$  时超高斯光脉冲的时域波形及其强度自相关曲线。由图 3 可见,在  $t = 3$  处有幅值  $a = 0.3$  的噪声脉冲时,原光脉冲时域波形几乎不变,时域宽度比无噪声脉冲时稍微增宽;光脉冲自相关曲线在  $|t| = 3$  处出现两个

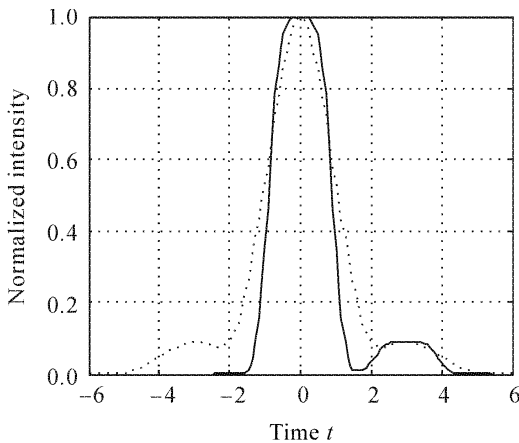


图 3  $m = 2, C = 0, a = 0.3$  和  $b = 3$  时,超高斯光脉冲的时域波形(实线)及其强度自相关曲线(点线)

Fig. 3 Temporal waveform (solid curve) and intensity autocorrelation curve (dotted curve) of super-Gaussian pulse for  $m = 2, C = 0, a = 0.3$  and  $b = 3$

基本对称的振荡结构;光脉冲自相关曲线半峰全宽比无噪声脉冲时亦稍宽。在  $C$  和  $b$  不变的情况下,当噪声脉冲幅值  $a$  增加时,光脉冲的时域宽度和自相关曲线宽度随之稍微增宽,自相关曲线上的振荡结构随之增大。

图 4 为  $m = 2, C = 0, a = 0.3$  和  $b = 3$  时超高斯光脉冲频谱曲线及其自相关频谱曲线。由图 4 可见,在  $t = 3$  处有幅值  $a = 0.3$  的噪声脉冲时,光脉冲频谱曲线及其自相关频谱曲线的边缘都出现了对称的振荡结构和底座,自相关频谱曲线边缘振荡结构和底座的位置比脉冲频谱曲线边缘的要高;光脉冲的频谱宽度和自相关频谱宽度比无噪声脉冲时稍窄。在  $C$  和  $b$  不变的情况下,当噪声脉冲幅值  $a$  增加时,光脉冲的频谱宽度和自相关频谱宽度随之减小,两曲线上的振荡结构随之增大。

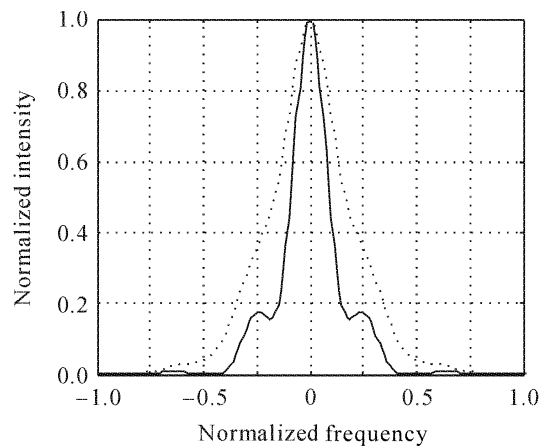


图 4  $m = 2, C = 0, a = 0.3$  和  $b = 3$  时,超高斯光脉冲的频谱(实线)及其自相关频谱(点线)

Fig. 4 Spectral curve (solid curve) and autocorrelation spectral curve (dotted curve) of super-Gaussian pulse for  $m = 2, C = 0, a = 0.3$  and  $b = 3$

在  $a$  和  $b$  相同的情况下,当啁啾参量  $|C|$  增加时 ( $|C| = 0.5$ ),与图 4 相比,光脉冲的时域宽度和自相关曲线宽度及其曲线形状几乎不变。光脉冲的频谱宽度和自相关频谱宽度随之稍微增加,两曲线上

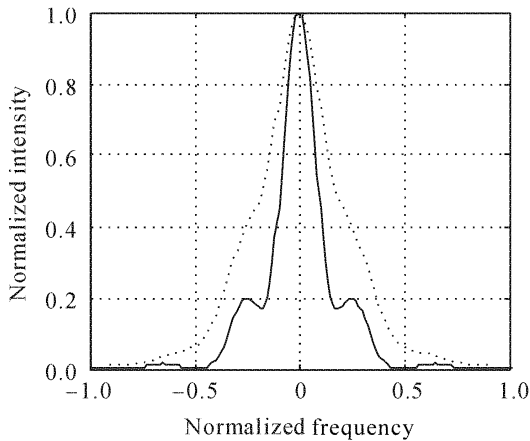


图 5  $m = 2$ ,  $|C| = 0.5$ ,  $a = 0.3$  和  $b = 3$  时,超高斯光脉冲的频谱(实线)及其自相关频谱(点线)

Fig. 5 Spectral curve (solid curve) and autocorrelation spectral curve (dotted curve) of super-Gaussian pulse for  $m = 2$ ,  $|C| = 0.5$ ,  $a = 0.3$  and  $b = 3$

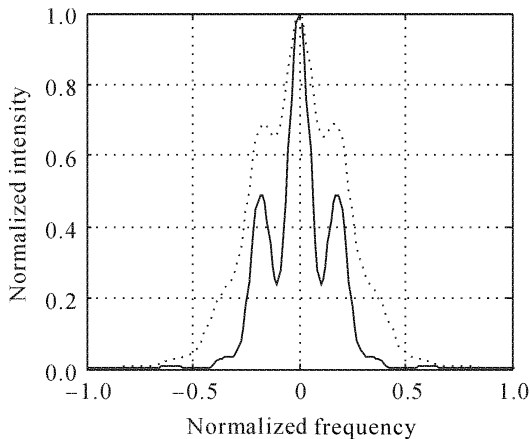


图 6  $m = 2$ ,  $C = 0$ ,  $a = 0.3$  和  $b = 5$  时,超高斯光脉冲的频谱(实线)及其自相关频谱(点线)

Fig. 6 Spectral curve (solid curve) and autocorrelation spectral curve (dotted curve) of super-Gaussian pulse for  $m = 2$ ,  $C = 0$ ,  $a = 0.3$  and  $b = 5$

的振荡结构随之增大,如图 5 所示。

在噪声脉冲幅值  $a$  和啁啾参量  $|C|$  相同的情况下,当噪声脉冲与原光脉冲的间隔增大时 ( $b = 5$ ),与图 4 相比,光脉冲的时域宽度和自相关曲线宽度随之减小,噪声脉冲对光脉冲时域波形和自相关曲线形状的影响越来越小。光脉冲的频谱和自相关频谱曲线上的振荡结构随之剧烈增大,甚至出现严重的频谱分裂现象,如图 6 所示。这为我们使用二次谐波-频率分辨光学门脉冲分析仪或者基于自相关技术原理的仪器测量脉冲特性提供了重要参考。要准确测量脉冲特性,一定要选择合适的时域扫描窗口,并尽可能使时域扫描窗内没有噪声脉冲。

### 3.3 仪器随机噪声对超高斯光脉冲自相关特性的影响

通常情况下,二次谐波-频率分辨光学门脉冲分析仪存在电荷耦合器件(CCD)引入的随机噪声。该噪声随器件温度升高而增大,表现为随测量时间的增加而增大。测量时间较长时,该噪声通常为正值,且对测量数据有一定影响。这里采用数值计算方法,以光脉冲的二维函数  $I_t(\omega, \tau) = |\tilde{E}_t(\omega, \tau)|^2$  数据最大值的 1%~10% (噪声系数) 乘以 0~1 之间的随机函数值模拟随机噪声,分析了随机噪声对光脉冲强度自相关和自相关频谱参量的影响。

图 7, 8 分别是在  $m = 2$ ,  $C = 0$  时超高斯光脉冲的强度自相关曲线和自相关频谱曲线。图 7 和图 8 数值计算采用时域窗口为  $(-20, 20)$ , 采样点数为 512, 噪声系数为 5%。由图 7, 8 可以看出,在时域和频谱中心区域,有随机噪声的强度自相关时域宽度和自相关频谱宽度偏离无噪声的情况;在时域和频谱边缘区域,有随机噪声的强度自相关曲线和自相关频谱曲线高于无噪声的情况。当随机噪声幅度增加时,在时域和频谱边缘区域,有随机噪声的强度自相关曲线和自相关频谱曲线随之明显增高;在时域和频谱中心区域,有随机噪声的强度自相关时域宽度和自相关频谱宽度与无噪声的差别增大;脉冲越宽,采样点数越多,时域窗口越小,时域受影响越大。

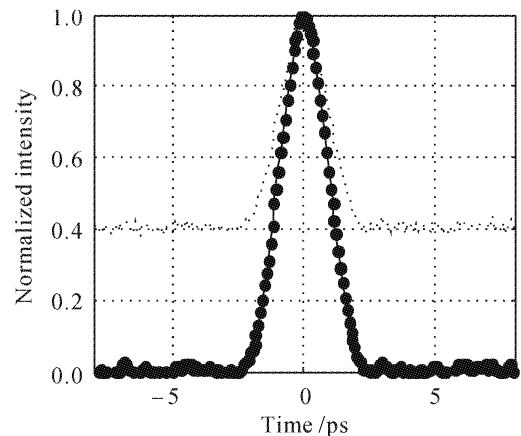


图 7  $m = 2$ ,  $C = 0$  时,超高斯光脉冲的强度自相关曲线  
实线为无噪声情况,点线为有随机噪声情况,  
实点为滤除随机噪声后的数据

Fig. 7 Intensity autocorrelation curve of the super-Gaussian pulse for  $m = 2$  and  $C = 0$   
solid curve is without noise, dotted curve is with random noise,  
solid dots are data after filtering random noise

考虑到脉冲自相关曲线或自相关频谱曲线边缘(大于 2 倍的半峰全宽时)趋近于零,在频率分辨光

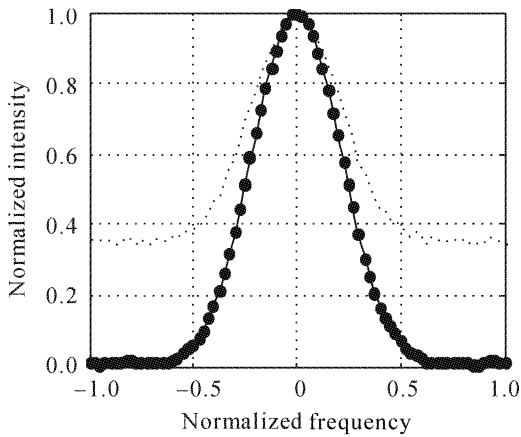


图8  $m = 2, C = 0$  时, 超高斯光脉冲的自相关频谱曲线  
实线为无噪声情况, 点线为有随机噪声情况,  
实点为滤除随机噪声后的数据

Fig. 8 Autocorrelation spectral curve of the super-Gaussian pulse for  $m = 2$  and  $C = 0$

solid curve is without noise, dotted curve is with random noise,  
solid dots are data after filtering random noise

学门图数据  $I_l(\omega, \tau)$  边缘各取  $n$  列或行 (本文  $n = 10$ ) 个数据求和, 以其平均值作为各点的噪声值, 在频率分辨光学门图数据各个数据点滤除噪声值, 然后对数据作平滑滤波处理 (即第  $n-1, n, n+1$  三个数据的平均值作为第  $n$  个数据) 且归一化到峰值。采取该方法处理后的数据如图 7, 8 中的实点所示, 由图可见, 滤波处理后的数据与脉冲无噪声的自相关曲线和自相关频谱曲线完全吻合。当改变时域窗口和采样点数时, 发现该滤波方法处理后数据依旧与无噪声情况吻合。可见, 使用二次谐波-频率分辨光学门脉冲分析仪或者基于自相关技术原理的仪器测量脉冲特性一定要选择合适的扫描窗口和合适的采样点数, 尽可能在测量前就采取必要的消噪处理或者对含有噪声的测量数据做必要的滤波处理。

### 3.4 超高斯光脉冲 ( $m=1$ ) 自相关特性测量实验

利用二次谐波-频率分辨光学门脉冲分析仪对半导体锁模激光器输出的中心波长 1548.05 nm 光脉冲进行了测量分析, 得到该脉冲为时域半峰全宽 2.21 ps, 频谱半峰全宽 2.23 nm, 时间带宽积 0.615, 线性啁啾参量  $C = -1$  的超高斯光脉冲 ( $m = 1$ )。脉冲归一化包络电场可写为

$$U(t) = \exp\left[-\frac{(1+iC)t^2}{2t_0^2}\right], \quad (12)$$

式中  $t_0 = 2.21/1.665$  ps。图 9 和 10 分别是超高斯光脉冲 ( $m = 1$ ) 的强度自相关和自相关频谱曲线, 实线为测量得到的实验曲线, 点线为利用 3.3 节方法去除随机噪声后的曲线, 实点为由 (12) 式理论计

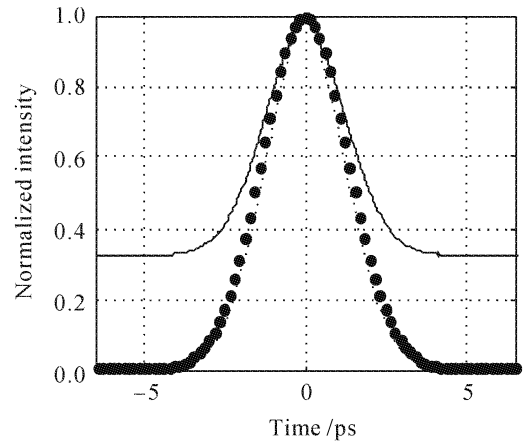


图9 高斯光脉冲的强度自相关曲线  
实线为测量得到的实验曲线, 点线为去除随机噪声后的曲线,  
实点为理论计算得到的自相关曲线数据

Fig. 9 Intensity autocorrelation curve of the super-Gaussian pulse for  $m = 1$

solid curve is experimental curve, dotted curve is the data after filtering random noise, solid dots are the data from theoretical calculation

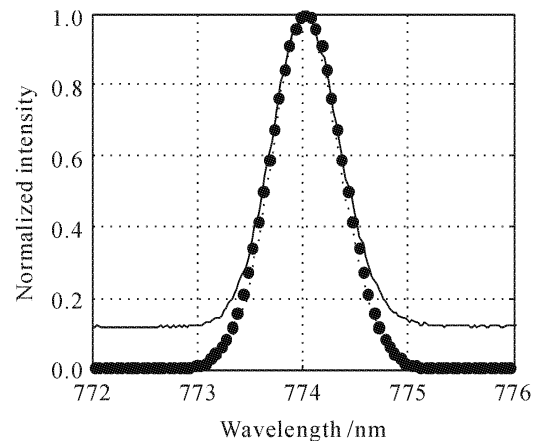


图10 高斯光脉冲的自相关频谱曲线  
实线为测量得到的实验曲线, 点线为去除随机噪声后的曲线,  
实点为理论计算得到的自相关曲线数据

Fig. 10 Autocorrelation spectral curve of the super-Gaussian pulse for  $m = 1$

solid curve is experimental curve, dotted curve is the data after filtering random noise, solid dots are the data from theoretical calculation

算得到的自相关曲线数据。由图 9, 10 可见, 利用二次谐波-频率分辨光学门实验测量得到的超高斯光脉冲 ( $m = 1$ ) 的自相关曲线较平滑, 时域关于零时延对称, 频域关于倍频中心波长对称, 表明光脉冲时域和频域形状较规则。但是, 测量得到的实验曲线包含较大的随机噪声, 在实验数据的后处理过程中必须首先滤除噪声。滤除噪声后的曲线与由 (12) 式数值计算得到的数据在时域和频域均吻合得很好,

进一步证明了 3.3 节滤除随机噪声方法的可靠性和可行性。

## 4 结 论

采用数值分析方法研究了超高斯光脉冲的自相关特性及其受锐度参量  $m$ , 啁啾参量  $|C|$ , 噪声脉冲和随机噪声影响的变化规律, 并与原脉冲相应参量作了比较, 给出了一个有效滤除随机噪声的方法, 并用实验作了验证。同时为使用二次谐波-频率分辨光学门脉冲分析仪或者基于自相关技术原理的仪器测量脉冲特性提供了重要参考。测量脉冲特性一定要选择合适的扫描窗口和合适的采样点数, 尽可能在测量前就采取必要的消除随机噪声处理或者对含有噪声的测量数据做必要的滤波处理, 尽可能使时域扫描窗内没有噪声脉冲。当  $m$  增加时, 光脉冲的强度自相关曲线边缘稍内缩, 半峰全宽稍窄, 与时域波形的平顶展宽, 前后沿下降速度加快不同; 光脉冲频谱宽度展宽, 边缘的振荡结构随之增大; 自相关频谱曲线亦随之展宽, 其边缘仍然较平滑。当  $|C|$  增大时, 光脉冲的时域波形及其强度自相关曲线保持不变; 光脉冲的频谱曲线随之展宽, 边缘出现振荡结构并随之增强, 自相关频谱曲线亦随之展宽, 边缘依旧平滑。存在噪声脉冲和随机噪声的情况下, 超高斯脉冲的自相关特性随噪声脉冲参量  $a$  和  $b$  等的变化比较复杂。

## 参 考 文 献

- G. P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics & Applications of Nonlinear Fiber Optics* [M]. Jia Dongfang, Yu Zhenhong, Tan Bin *et al.* transl. 3rd edition. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002. 55~62  
G. P. 阿戈沃. 非线性光纤光学原理及应用[M]. 贾东方, 余震虹, 谈 斌等译. 第3版. 北京: 电子工业出版社, 2002. 55~62
- Daniel J. Kane, Rick Trebino. Characterization of arbitrary femtosecond pulses using frequency-resolved optical gating [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1993, **29**(2): 571~579
- Wang Zhaohua, Wei Zhiyi, Teng Hao *et al.*. Measurement of femtosecond laser pulses using SHG frequency resolved optical gating technique [J]. *Acta Physica Sinica*, 2003, **52**(2): 362~366  
王兆华, 魏志义, 滕 浩等. 飞秒激光脉冲的谐波频率分辨光学开关法测量研究[J]. *物理学报*, 2003, **52**(2): 362~366
- Pierre-Ambroise Lacourt, John M. Dudley, Jean-Marc Merolla *et al.*. Milliwatt -peak-power pulse characterization at 1.55  $\mu\text{m}$  by wavelength-conversion frequency -resolved optical gating [J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(10): 863~865
- L. P. Barry, S. Del burgo, B. Thomsen *et al.*. Optimization of optical data transmitters for 40-Gb/s lightwave systems frequency resolved optical gating [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2002, **14**(7): 971~973
- Liu Shanliang, Zheng Hongjun. Experimental research on the characteristic measurement of the short pulses before and after propagating in dispersion-flattened fiber [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(2): 199~205  
刘山亮, 郑宏军. 短脉冲在色散平坦光纤中传输前后波形、相位和啁啾测量的实验研究[J]. *中国激光*, 2006, **33**(2): 199~205
- Luo Shirong, Lü Baida, Zhang Bin. A comparison study on the propagation characteristics of flattened Gaussian beams and super-Gaussian beams [J]. *Acta Physica Sinica*, 1999, **48**(8): 1446~1451  
罗时荣, 吕百达, 张 彬. 平顶高斯光束与超高斯光束传输特性的比较研究[J]. *物理学报*, 1999, **48**(8): 1446~1451
- Qing Yusan, Lü Baida. Similar propagation property of flattened Gaussian beams and super-Gaussian beams [J]. *High Power Laser & Particle Beams*, 2001, **13**(6): 675~678  
卿与三, 吕百达. 平顶高斯光束和超高斯光束传输特性的相似性[J]. *强激光与粒子束*, 2001, **13**(6): 675~678
- Wu Jianwei, Xia Guangqiong, Wu Zhengmao. Transmission characteristics of super-Gaussian optical pulse in the single-mode optical fiber [J]. *Laser Technology*, 2003, **27**(4): 342~344  
吴建伟, 夏光琼, 吴正茂. 超高斯光脉冲在单模光纤中的传输特性[J]. *激光技术*, 2003, **27**(4): 342~344
- Cao Jianqiu, Lu Qisheng. Influence of higher-order dispersion on super-Gaussian optical pulse in the single-mode optical fiber [J]. *Laser Technology*, 2006, **30**(2): 209~211  
曹涧秋, 陆启生. 单模光纤中高阶色散对超高斯光脉冲传播的影响[J]. *激光技术*, 2006, **30**(2): 209~211
- M. Desaix, L. Helczynski, D. Anderson *et al.*. Propagation properties of chirped soliton pulses in optical nonlinear Kerr media [J]. *Phys. Rev. E*, 2002, **65**(5): 056602-1~056602-6
- Zhonghao Li, Lu Li, Huiping Tian *et al.*. Chirped femtosecond solitonlike laser pulse form with self-frequency shift [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2002, **89**(26): 263901-1~263901-4
- Zheng Hongjun, Liu Shanliang. Effects of initial frequency chirp on the linear propagation characteristics of the exponential optical pulse [J]. *Chin. Phys.*, 2006, **15**(08): 1831~1837