

文章编号: 1001-5078 (2006) 10-0981-04

频率啁啾对自相关法测量光脉冲宽度的影响

彭越, 燕萌, 张洪明, 姚敏玉
(清华大学电子工程系, 北京 100084)

摘要: 文章讨论了脉冲频率啁啾对用自相关法测量产生的误差, 就脉冲的线性啁啾、二次啁啾对测量结果的影响进行了理论分析和仿真计算。还提出了修正二次啁啾影响的简单方案, 并结合实验测量结果进行了验证。

关键词: 光通信; 自相关; 脉宽测量; 光脉冲啁啾

中图分类号: TN206 **文献标识码:** A

The Influence of Chirp on Measuring Optical Pulse Width with Autocorrelation Method

PENG Yue, YAN Meng, ZHANG Hongming, YAO Min-yu
(Electronic Engineering Department, Tsinghua university, Beijing 100084, China)

Abstract: In the paper the autocorrelation error caused by the pulse chirp is analyzed. After analyzing the theory, the influence of linear chirp, quadratic chirp is simulated respectively. According to a method of revising quadratic chirp, the same result is gotten with the experiment.

Key words: optical communication; autocorrelation; pulse width measure; optical pulse chirp

1 引言

在许多光学领域中,超短光脉冲的测量显得愈来愈重要。目前使用较多的测量皮秒量级激光超短脉冲宽度的方法是自相关法。通过自相关函数宽度的确定,可以导出脉冲的宽度。

所谓自相关法就是让待测的激光脉冲通过一台 Michelson 干涉仪,使同一脉冲分为幅度上同等大小、时间上有一定延迟的两个脉冲。当两个脉冲到达接收器时产生干涉信号。根据延迟时间的不同,干涉信号的大小也不同。该信号随着脉冲延迟的变化即对应于脉冲的自相关函数。

自相关测量方法主要分为线性自相关法和二次自相关法,其中二次自相关法又分为二次谐波 (SHG)法和双光子吸收 (TPA)法^[1]。虽然二次自相关法可以获得的信息更多,但是它需要待测脉冲的峰值功率较高^[1],只适于亚皮秒量级脉冲的测量。而线性自相关法接收器结构简单,对待测脉冲

的功率要求较低,也可以用于皮秒量级脉冲的测量。图 1 示出其装置图。

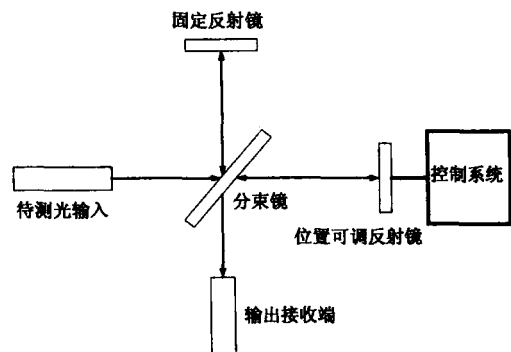


图 1 自相关系统装置图

Fig 1 equipment of autocorrelation system

基金项目: 本项目得到国家自然科学基金 (60477021) 的资助。

作者简介: 彭越 (1983 -), 男, 清华大学电子工程系集成光电子国家重点实验室博士研究生, 主要从事高速光信号处理与光通信方面的研究。E-mail: y-peng05@mails.tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2006-04-06

线性自相关测量中存在的一个主要问题是待测脉冲存在的啁啾会对测量结果产生较大的影响。不同级次的啁啾会对自相关图形产生不同的效果,对实际测量产生很多不利的因素。本文将着重从理论上分析频率啁啾对自相关测量的影响,得到有益的结论,提出了修正误差的方法,并结合实验结果验证了理论的正确性。

2 理论分析

设信号光电场的复振幅为 $U(t)$,角频率为 ω_0 ,则具有时延差 τ 的干涉仪出射光的复振幅为:

$$E(t) = U(t) \exp(-i\omega_0 t) + U(t-\tau) \exp[-i\omega_0(t-\tau)] \quad (1)$$

光场入射到线性功率探测器,因光探测器具有比脉冲宽度长得多的时间响应特性,所以测得的光强度为:

$$S_1(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} |E(t)|^2 dt \quad (2)$$

将式 (1)代入式 (2),光场的线性自相关信号可以写为^[2]:

$$S_1(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} |1 + \text{Re}[G_1(\tau) \exp(-i\omega_0 \tau)]| \quad (3)$$

其中, $G_1(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} E(t) E^*(t-\tau) dt$, $G_1(\tau)$ 代表了电磁场的自相关。

下面讨论考虑待测脉冲存在的啁啾对自相关图形产生的影响。

假设存在线性啁啾,则高斯型脉冲表达式可写为:

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

式中, C 为线性啁啾参量; T_0 为无啁啾脉冲宽度。脉冲的强度可表示为:

$$A(T) = |U(T)|^2 = \exp\left(-\frac{T^2}{T_0^2}\right) \quad (5)$$

由上式可得脉宽为:

$$T_{3dB} = \sqrt{\ln 2} T_0$$

光场的线性自相关信号为:

$$S_1(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} |1 + \text{Re}[G_1(\tau) \exp(-i\omega_0 \tau)]| \quad (6)$$

式中, $G_1(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} U(T) U^*(T-\tau) dT = \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left[-\frac{(1+iC)T^2}{2T_0^2} - \frac{(1-iC)(T-\tau)^2}{2T_0^2}\right] dT$

得到 $S_1(\tau)$ 的包络为:

$$G_1(\tau) = \exp\left[-\frac{(1+C^2)\tau^2}{4T_0^2}\right] \quad (7)$$

自相关包络的宽度为:

$$T_{3dB} = \frac{2}{\sqrt{1+C^2}} \sqrt{\ln 2} T_0 \quad (8)$$

从式 (8)可以看出,有线性啁啾的高斯型脉冲的自相关图形 3dB 脉宽 T_{3dB} 是实际光信号脉宽 T_0 的 $\frac{2}{\sqrt{1+C^2}}$ 倍,也就是说,自相关信号的 3dB 带宽随着信号啁啾 C 的增大而以 $\frac{1}{\sqrt{1+C^2}}$ 减小。

图 2(a)、(b)、(c)、(d)分别为线性啁啾参量 $C=0, 1, 2, 5$ 时仿真得到的自相关图形。

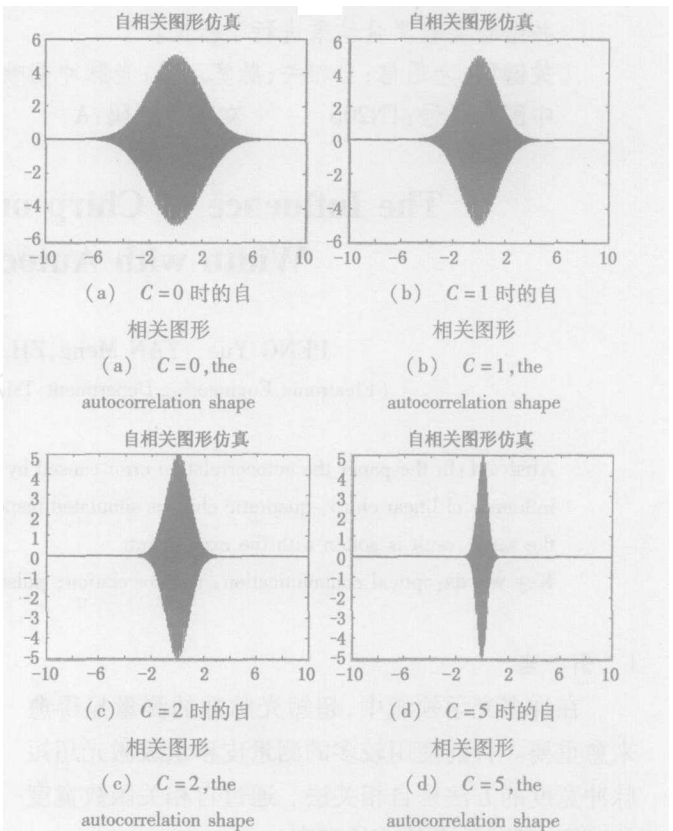


图 2 不同啁啾下的自相关图形

Fig. 2 the autocorrelation shape with C

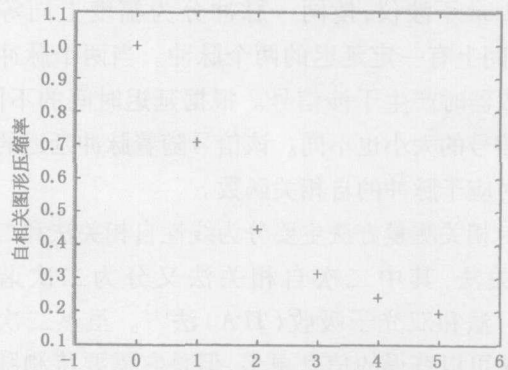


图 3 一次啁啾系数 C 与自相关图形压缩率曲线

Fig. 3 the autocorrelation shape compression ratio with the coefficient of linear chirp

由图 3 可以看到,当线性啁啾系数 C 较大时,自相关图形将会明显压窄,无法直接从自相关图形中读出准确的脉冲宽度。并且一次啁啾对于线性自相关图形的影响是无法通过对数据的修正拟和来纠正的。

在自相关测量过程中,不仅要考虑到线性啁啾,还要考虑到二次啁啾的影响,此时高斯脉冲的表达式为:

$$U(T) = \exp\left[-\frac{(1+iC)T^2}{2T_0^2} - \frac{DT^3}{2T_0^3}\right] \quad (9)$$

其中, C 为线性啁啾参量; D 为二次啁啾参量; T_0 为脉冲初始宽度。

根据式 (3) 得:

$$\begin{aligned} G_1(\tau) &= \int_{-\infty}^{+\infty} U(T)U^*(T-\tau) dT \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left[-\frac{(1+iC)T^2}{2T_0^2} - \frac{DT^3}{2T_0^3} - \frac{(1-iC)(T-\tau)^2}{2T_0^2} - \frac{D(T-\tau)^3}{2T_0^3}\right] dT \end{aligned} \quad (10)$$

算得式 (2) 中 $S_1(\tau)$ 的包络为:

$$G_1(\tau) \approx \exp\left\{-\frac{2(1+C^2)T_0^2\tau^2 + \frac{9}{2}D^2T_0^4 + i\tau(3C^2-1)DT_0^3 - \frac{9}{4}D^3\tau^5}{2T_0^3(4T_0^2+9D^2\tau^2)}\right\} \quad (11)$$

由式 (11) 可以看出,当脉冲存在二次啁啾的情况下,自相关图形函数指数部分的实数项会使得自相关图形压窄。由于指数部分还存在虚数项,这样就会引起图形的振荡。并且振荡频率与延迟时间、二次啁啾系数 D 和线性啁啾 C 都有关系。在自相关图形上反映出的就是图形两侧出现衰减振荡。

图 4(a) ~ (d) 分别是二次啁啾系数 $D = 1, 2, 5, 10$ 时仿真得到的自相关图形。在图 4 中二次啁啾的影响体现在自相关图形两侧的振荡,可以看到啁啾越强烈两侧的振荡峰就越多。同时二次啁啾对自相关图形也伴随了一定的压窄。

此时可以将式 (11) 近似看成自相关信号的包络对一个正弦信号调制,从而产生出自相关图形两侧的振荡。如果要恢复出自相关信号的包络,可以将每一个震荡峰的峰值找出,并根据待测光脉冲信号作为高斯型信号,对得到的数据进行高斯拟和,从而消除二次啁啾对自相关图形的影响。如图 5 所

示。图中 a 线表示未修正的存在二次啁啾的自相关图形的包络; b 线表示不存在二次啁啾的自相关图形的包络; c 线表示对 a 线的数据进行高斯拟和后得到的自相关图形。

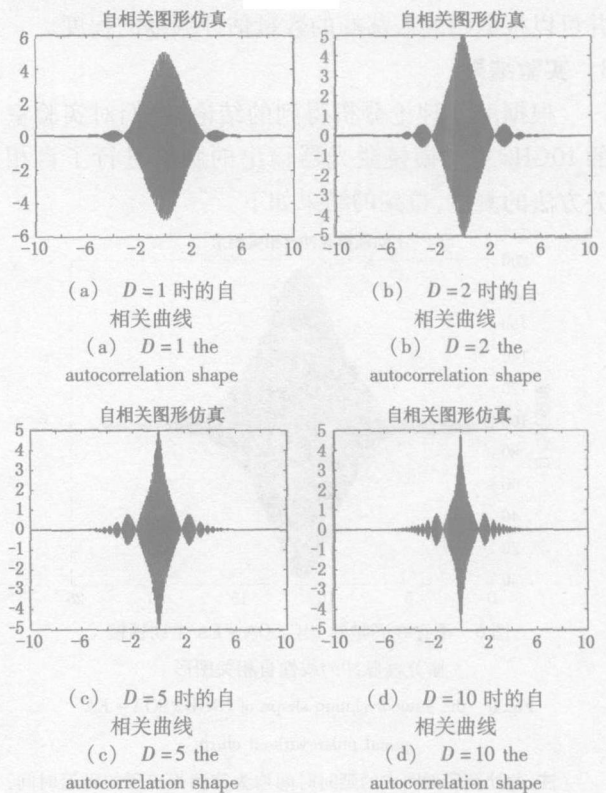


图 4 二次啁啾对自相关图形的影响
Fig. 4 the autocorrelation shape with D

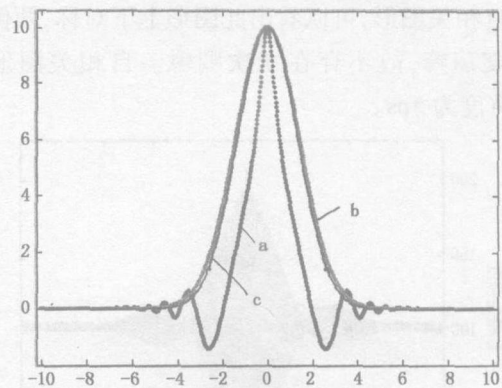


图 5 存在二次啁啾的自相关图形的拟和修正
Fig. 5 the correct of autocorrelation shape with quadratic chirp

从图 5 中可以看出,通过对有二次啁啾的自相关图形进行高斯拟和,可以有效地消除二次啁啾对自相关图形的影响,减小测量脉冲宽度时的误差。

由前面的讨论可以得到:一次啁啾使自相关图形压窄,而且无法通过对数据的拟和修正;二次啁啾使图形两侧出现振荡峰,同时对图形也有一定的压窄,但是可以通过高斯拟和消除二次啁啾的影响。

对于有线性啁啾的脉冲,测量出线性自相关图形后,可以利用示波器直接测量得到实际的脉冲宽度,利用式(8)计算出脉冲的线性啁啾系数 C 。通过观察线性自相关图形,可以判断脉冲有无二次啁啾存在,并可以根据两侧振荡峰的数量估计啁啾的程度。

3 实验结果

根据前面理论分析得到的结论,我们对实验室的 10GHz主动锁模激光器输出的脉冲进行了自相关方法的测量,得到的结果如下。

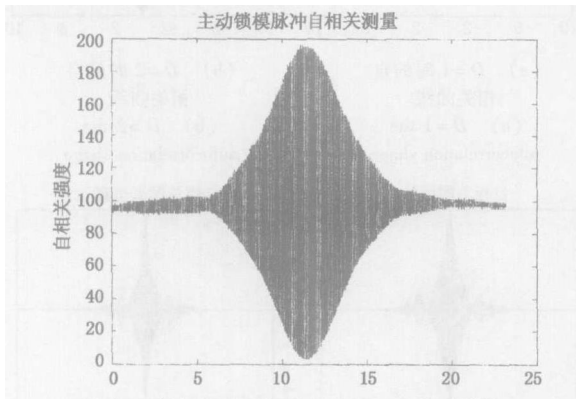


图 6 不存在啁啾的 10G SOA + EA 主动锁模激光器脉冲的线性自相关图形

Fig 6 the autocorrelation shape of 10GHz SOA + EA optical pulse without chip

(注:此处及后面图中的延时时间均为待测光单程的延迟时间,即 $\tau/2$)

图 6是在实验中测得的 10GHz主动锁模光脉冲的自相关图形,可以看出此图形上下对称,两侧没有的震荡峰,故不存在二次啁啾。自相关图形的 3dB 宽度为 5ps。

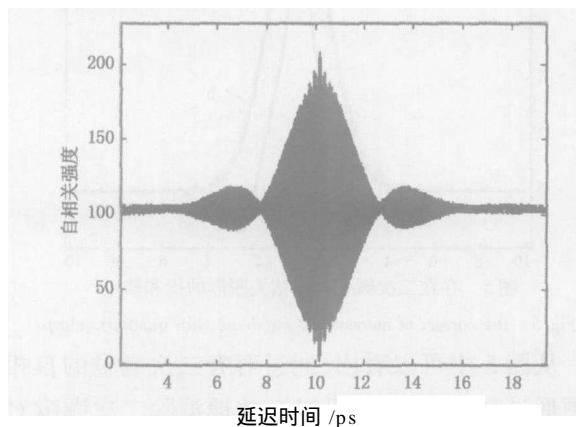


图 7 存在二次啁啾的 10G SOA + EA 主动锁模激光器脉冲的线性自相关图形

Fig 7 the autocorrelation shape of 10GHz SOA + EA optical pulse with quadratic chip

实验中也可以测到图 7中的自相关图形,两侧

有明显的振荡峰存在,因此可以判断出此脉冲存在二次啁啾。通过对数据的高斯拟和消除了二次啁啾的影响后,得到自相关图形的 3dB 宽度为 5ps。

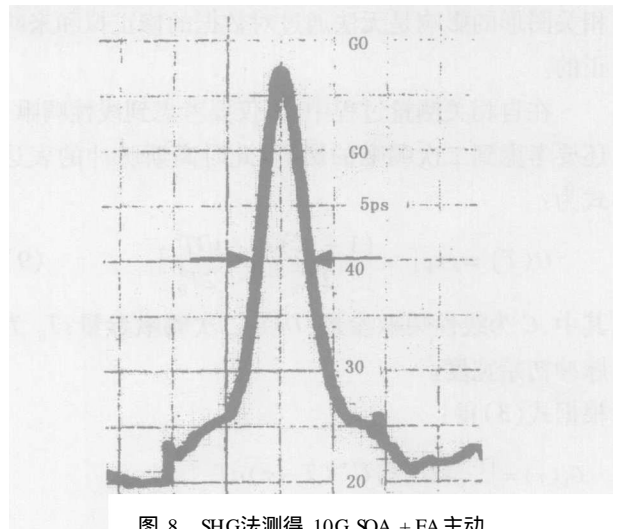


图 8 SHG法测得 10G SOA + EA 主动锁模脉冲自相关图形

Fig 8 the autocorrelation shape of 10GHz SOA + EA optical pulse by SHG method

图 8示出使用倍频晶体的 SHG法测得脉冲,其宽度为 5ps。通过和上述线性自相关法测得的脉冲宽度进行比较可以得出,在脉冲一次啁啾较小的情况下,线性自相关法也可以得到比较精确的测量结果。

4 结论

线性自相关方法实验装置简单,适用功率较低的光脉冲测量。其测量结果容易受到脉冲啁啾的影响,产生误差。通过理论分析和实验结果的验证,一次啁啾使自相关图形压窄,二次啁啾使图形两侧出现振荡峰,提出了修正二次啁啾影响的方法,并结合实验结果进行了验证。通过啁啾对测量结果影响的分析,为今后进一步研究自相关测量超短脉冲打下基础。

参考文献:

[1] K Kikuchi Highly sensitive interferometric autocorrelator using Si avalanche photodiode as two-photon absorber [J]. Electronics Letters, 1998, 34 (1): 123 - 125.
 [2] K Naganuma, K Mogi, H Y. General Method for Ultra-short Light Pulse Chip Measurement [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1989, 25 (6): 1225 - 1233.