

线性扫频光脉冲功率谱的理论分析

张筑虹 范滇元

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

提 要

本文给出了线性扫频(啁啾)的高斯型光脉冲的功率谱表达式,它等效于有调制的、脉宽压窄的无啁啾光脉冲的功率谱。理论分析表明:啁啾可由脉冲的功率谱并借助强度自相关方法确定。
关键词: 啁啾, 功率谱。

一、引 言

啁啾定义为光场位相 $\Phi(t)$ 的两阶导数的常数项。传统的强度自相关方法无法给出 $\Phi(t)$ 的信息,因此,不能反映啁啾。近来的研究提供了借助傅里叶分析重复拟合法^[1]和共振增加法^[2]来测定 $\Phi(t)$ 。本文提出利用啁啾脉冲功率谱结合强度自相关方法测定啁啾的物理考虑,给出了啁啾脉冲功率谱函数,选取适当的变换极限脉冲进行分析比较,阐明啁啾补偿压窄脉冲的机理,为啁啾的实验测定和进一步研究打下基础。

二、理论分析

假定啁啾脉冲为高斯型,其场 $E(t)$ 和瞬时频率 $\omega(t)$ 分别为

$$E(t) = E_0 \exp(-2t^2/T^2) \exp i[\omega_0 t + (\delta\omega_m t^2/2T)], \quad (1)$$

$$\omega(t) = \frac{d\Phi(t)}{dt} = \omega_0 + \frac{\delta\omega_m}{T} t, \quad (2)$$

式中 E_0 为场振幅, ω_0 为中心频率, T 为场峰值强度为 $(1/e)$ 处的全宽度, $\delta\omega_m$ 为 T 范围内啁啾所覆盖的频率范围。脉冲的频率谱 $E(\omega)$ 可以由傅里叶变换给出

$$\left. \begin{aligned} \tilde{E}(\omega) &= \int_{-\infty}^{\infty} E(t) \exp(i\omega t) dt \\ &= \left(\frac{2\pi}{\delta\omega_0 \delta\omega} \right)^{1/2} E_0 \left\{ \exp \left[\frac{-2(\omega - \omega_0)^2}{\delta\omega_0 (\delta\omega_0 + i\delta\omega_m)} - i \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{\delta\omega_m}{\delta\omega_0} \right) \right] \right. \\ &\quad \left. + \exp \left[\frac{-2(\omega + \omega_0)^2}{\delta\omega_0 (\delta\omega_0 - i\delta\omega_m)} + i \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{\delta\omega_m}{\delta\omega_0} \right) \right] \right\}, \\ \delta\omega_0 &= (4/T), \quad \delta\omega = [(\delta\omega_0)^2 + (\delta\omega_m)^2]^{1/2}, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中 $\delta\omega_0$ 为功率谱 $|\tilde{E}(\omega)|^2$ 的 $(1/e)$ 处全带宽(高斯型)。

(1) 无啁啾情况,有

$$\left. \begin{aligned} E_0(t) &= E_0 \exp(-2t^2/T^2) \exp(i\omega_0 t), \\ \tilde{E}'_0(\omega) &= \frac{(2\pi)^{1/2}}{\delta\omega_0} E_0 \left\{ \exp\left[\frac{-2(\omega-\omega_0)^2}{(\delta\omega_0)^2}\right] + \exp\left[\frac{-2(\omega+\omega_0)^2}{(\delta\omega_0)^2}\right] \right\} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

功率谱函数为

$$|\tilde{E}'_0(\omega)|^2 = 4 \frac{2\pi}{(\delta\omega_0)^2} E_0^2 \exp\left[-\frac{4(\omega-\omega_0)^2}{(\delta\omega_0)^2}\right]. \quad (5)$$

(2) 存在啁啾情况, 可推知其功率谱函数为

$$|\tilde{E}(\omega)|^2 = \frac{\delta\omega}{2\delta\omega_0} |\tilde{E}'(\omega)|^2 (1 + \cos D), \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} |\tilde{E}'(\omega)|^2 &= 4 \frac{2\pi}{(\delta\omega)^2} E_0^2 \exp\left[-\frac{4(\omega-\omega_0)^2}{(\delta\omega)^2}\right], \\ D &= B + (C^+ - C^-) \frac{\delta\omega_m}{\delta\omega_0}, \quad B = \tan^{-1} \frac{\delta\omega_m}{\delta\omega_0}, \\ C^+ &= -\frac{2(\omega-\omega_0)^2}{(\delta\omega)^2}, \quad C^- = -\frac{2(\omega+\omega_0)^2}{(\delta\omega)^2}. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

在此, 考虑啁啾脉冲强度自相关

$$\left. \begin{aligned} G^{(2)}(\tau) &= \int_{-\infty}^{\infty} I(t) I(t+\tau) dt, \\ I(t) &= E(t) E^*(t). \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

因为

$$I'(t) = E'(t) E'^*(t) = I(t), \quad (9)$$

所以啁啾脉冲与相应的无啁啾脉冲的自相关函数相一致, 在实验上意味着脉冲的 T 值可由此给出。

三、讨 论

考虑(5)、(6)、(7)式, 显然(7)式表示了 $(1/e)$ 峰值全宽度为 T' 的高斯型无啁啾变换极限光脉冲的功率谱

$$T' = \frac{4}{\delta\omega}. \quad (10)$$

(6)式则为啁啾脉冲的功率谱, 它等效于有调制的、宽度压窄的无啁啾光脉冲的功率谱, 其中调制项 M 为

$$M = \frac{\delta\omega}{2\delta\omega_0} (1 + \cos D). \quad (11)$$

当 $\cos D = -1$ 时, $M = 0$, 有

$$\omega = \omega_0 \pm \frac{\delta\omega}{2} \left\{ \frac{\delta\omega_0}{\delta\omega_m} \left[\tan^{-1} \left(\frac{\delta\omega_m}{\delta\omega_0} \right) - (2N+1)\pi \right] \right\}^{1/2}; \quad (12)$$

当 $\cos D = 1$ 时, $M = M_{\max}$, 有

$$\omega = \omega_0 \pm \frac{\delta\omega}{2} \left\{ \frac{\delta\omega_0}{\delta\omega_m} \left[\tan^{-1} \left(\frac{\delta\omega_m}{\delta\omega_0} \right) - 2N\pi \right] \right\}^{1/2}, \quad (13)$$

式中 N 为整数, 啁啾的正负决定 N 的截止值。

考虑到文中所作的线性扫频近似实质上是不计入实际光脉冲翼部所有的与中心部分符号相反的扫频因子, 而该扫频项的存在则是人们通常所认为的脉冲功率谱的准周期结构的

来由(拍频)。本文的分析中则清楚表明((11)式), 脉冲功率谱的准周期特点即使在线性扫频情况下也同样存在。

四、结 论

啾啾可由其功率谱给出, $\delta\omega_m$ 不仅可以由谱极大的包络所给出的 $\delta\omega$, 也可由谱中极值间隔分布中得到。功率谱表达式(6)表明: 啾啾补偿和频谱滤波的方法都可实现线性扫频光脉冲的压窄。线性扫频光脉冲的功率谱同样有准周期结构。理论分析为实验测定啾啾提供了依据。

参 考 文 献

- [1] H. Yoshiyama, Y. Shio *et al.*; «*Ultrafast Phenomena IV*, D. H. Auston & K. B. Eisenthal Edition», (Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1984), 30~34.
- [2] J. E. Rothenberg; *IEEE J. Quant. Electron.*, 1986, **QE-22**, No. 1 (Jan), 174~181.

Theory of power spectrum of linear frequency-swept optical pulses

ZHANG ZHUHONG AND FAN DIANYUAN

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

(Received 24 May 1990; revised 22 June 1990)

Abstract

Expressions of the power spectrum of linear frequency swept Gaussian pulses are given which are equivalent to the power spectrum of the modulated and compressed light pulses without chirping. The chirp ping be can determined by means of the power spectrum and the standard intensity autocorrelation.

Key words: chirp, power spectrum.