

载波相位对超短脉冲时间重心的影响*

杨振峰¹ 杨振军^{2**} 门艳彬²

(1 河北科技大学经济管理学院, 石家庄 050018)

(2 河北师范大学物理学院, 石家庄 050016)

摘要 以 Gauss、Hyperbolic Secant、Lorentz 三种脉冲为例, 利用理论推导和数值模拟的方法研究了载波相位对超短脉冲时间重心的影响, 并给出了三种脉冲的时间重心与载波相位的解析表达式和数值模拟的图形. 研究表明: 当脉冲包络的宽度短于一个光学振荡周期时, 载波相位对超短脉冲的时间重心开始有较显著的影响.

关键词 超短脉冲; 载波相位; 时间重心

中图分类号 TN24 **文献标识码** A

0 引言

目前, 随着超短脉冲技术飞速发展, 人们已经可以产生单周期甚至更短周期的激光脉冲. 由于脉冲宽度极短, 所以在它传输过程中有许多新的特点, 例如: 由空间和时间耦合效应引起的时间微分效应、Gouy 相移引起的时间反转、极反转、空间诱导色散效应等^[1~5]. 而超短脉冲具有新的特性, 也使对超短脉冲的研究方法有必要进行改进. 因此, 目前对超短脉冲的研究是一个热点问题^[6~11].

通常, 人们在研究激光脉冲时是不考虑载波相位的. 在脉冲较长时(相对于一个光学周期), 脉冲的包络是缓慢变化的, 载波相位对脉冲特性的影响是微不足道; 但脉冲较短时, 一般的缓变包络近似失效^[6,7], 载波相位的变化就必须考虑了. Brabec 等人^[8]研究了超短脉冲的平均角频率随载波相位的变化, 结果表明: 在脉冲宽度大于几个光学周期时, 用包络和载波来描述脉冲的方法是有效的. 对于长脉冲来说, 因为脉冲包络中含有许多载波振荡, 所以脉冲的时间重心的偏移与包络相比非常之小; 但是当脉冲宽度可以和载波的振荡周期相比拟时, 由于载波相位不同而引起的载波与包络之间的相对移动对脉冲的时间重心必定有影响. 在本文中, 以 Gauss、Hyperbolic Secant、Lorentz 三种脉冲为例, 研究了载波相位与超短脉冲的时间重心之间的关系. 结果表明, 当脉冲宽度短于一个光学振荡周期时, 载波相位对超短脉冲的时间重心开始有较显著的影响.

1 超短脉冲时间重心的计算

对于激光脉冲场, 可表示为

$$E(t) = A(t) \cos(\omega_0 t + \varphi) \quad (1)$$

式中 $A(t)$ 是脉冲的包络, 且为实函数; ω_0 为载波的角频率; φ 为载波相位.

对于脉冲的时间重心, 即脉冲的一阶时间矩, 其计算公式为

$$\langle t \rangle = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} t A^2(t) \cos^2(\omega_0 t + \varphi) dt}{\int_{-\infty}^{+\infty} A^2(t) \cos^2(\omega_0 t + \varphi) dt} \quad (2)$$

Gauss、Hyperbolic Secant、Lorentz 三种脉冲可以相应的表示为

$$A_G(t) = \exp(-t^2/2T_G^2) \quad (3a)$$

$$A_{HS}(t) = \sec(t/T_{HS}) \quad (3b)$$

$$A_L(t) = [1 + (t/T_L)^2]^{-1} \quad (3c)$$

式(3)中的 T 与其相应脉冲包络的半高全宽(Full Width at Half Maximum, 简称 FWHM)的关系为 $\tau_G = 2\sqrt{\ln 2} T_G$; $\tau_{HS} = 2 \ln(\sqrt{2} + 1) T_{HS}$; $\tau_L = 2\sqrt{\sqrt{2} - 1} T_L$.

将式(3)代入式(2)中, 可求得三种脉冲相应的时间重心

$$\langle t \rangle_G = -\frac{\omega_0 T_G^2 \sin(2\varphi) \exp(-\omega_0^2 T_G^2)}{1 + \cos(2\varphi) \exp(-\omega_0^2 T_G^2)} \quad (4a)$$

$$\langle t \rangle_{HS} = -\frac{\pi T_{HS} \sin(2\varphi) [\pi \omega_0 T_{HS} \coth(\pi \omega_0 T_{HS}) - 1]}{2[\pi \omega_0 T_{HS} \cos(2\varphi) + \sinh(\pi \omega_0 T_{HS})]} \quad (4b)$$

$$\langle t \rangle_L = -\frac{2\omega_0 T_L^2 \sin(2\varphi) \exp(-2\omega_0 T_L)}{1 + (1 + 2\omega_0 T_L) \cos(2\varphi) \exp(-2\omega_0 T_L)} \quad (4c)$$

至此, 求得了 Gauss、Hyperbolic Secant、Lorentz 三种脉冲的时间重心与载波相位的解析表达式.

2 超短脉冲的时间重心与载波相位的关系分析

图 1 中数值模拟出了 $\varphi = 0, \pi/4, 3\pi/4$ 时三种超短脉冲时间重心随脉冲宽度的变化. 采用的参量

* 河北师范大学青年基金资助课题

** Tel: 0311-7202752 Email: zjyang@vip.163.com

收稿日期: 2004-12-07

为 $\lambda_0 = 0.8 \mu\text{m}$, $T_0 = 2.67 \text{ fs}$ (T_0 为脉冲的光学载波周期). 载波相位在等于 $\pi/4$ 和 $3\pi/4$ 时对超短脉冲时间重心的影响是最大的, 分别达到最小和最大值. 这一点也可以从式(4)中直观的看到, 由于式(4a), (4b), (4c) 载波相位对脉冲时间重心的影响都由 $\sin(2\varphi)$ 决定, 而在 $\varphi = \pi/4$ 和 $3\pi/4$ 时, $\sin(2\varphi)$ 得到最大和最小值. 需要注意的是脉冲时间重心表达式前有一负号, $\sin(2\varphi)$ 达到最大和最小值时对应脉冲时间重心的最小和最大值. 从图 1 中可以看到, 当脉冲宽度大于一个光学周期时, 不同的载波相位对脉冲时间重心是没有影响的. 但是当脉冲宽度低于一个光学周期时, 载波相位对脉冲时间重心的影响开始显著起来, 尤其是脉冲宽度低于半个光学周期时, 载波相位对脉冲的时间重心影响巨大, 这时对超短脉冲进行研究则必须考虑载波相位. 从式(4)中还可以看到 $\varphi = 0$ 时, 由于 $\sin(2\varphi) = 0$, 所以超短脉冲的时间重心没有偏移.

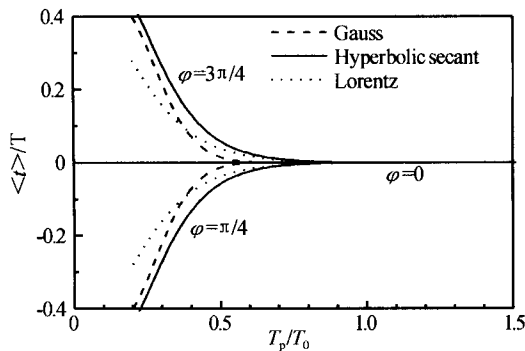


图 1 超短脉冲时间重心随脉冲宽度的变化示意图
Fig. 1 The relation between the center of time gravity of the pulse and the pulsed width

需要说明的一点是, 由于载波是以相速度运动, 而脉冲包络是以群速度运动, 所以激光器产生的脉冲相位不可能有一个固定的载波相位, 即使是锁模激光器也不例外.

图 2 是图 1 在脉冲宽度为 $0.5 T_0$ 时的横截面示意图.

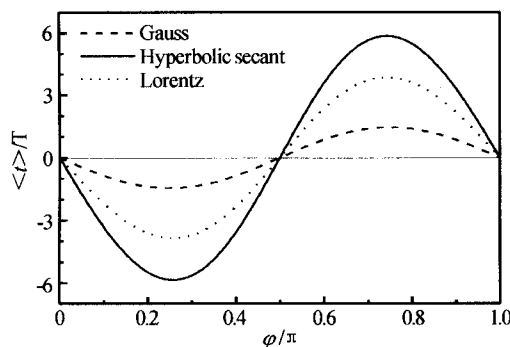


图 2 脉冲时间重心随载波相位的变化
Fig. 2 Variety of the center of time gravity $\tau_0 = 0.5 T_0$

3 结论

超短脉冲由于脉冲宽度极短, 呈现出了一系列的新现象, 成为当前激光领域中的一个热点问题. 目前已经可以产生接近甚至不足一个光学振荡周期的超短脉冲, 所以对脉冲的研究方法也有必要重新考虑和改进, 例如脉冲宽度低于一个光学周期的超短脉冲的频率重心会有所改变^[8]; 由于超短脉冲空间奇异性的出现会导致通常使用的缓变包络近似和 CAE 解析表达式的失效, 而必须使用复解析信号理论^[6,7]等. 本文以 Gauss、Hyperbolic Secant、Lorentz 三种脉冲为例, 研究了载波相位与超短脉冲时间重心之间的关系. 结果表明, 当脉冲宽度短于一个光学振荡周期时, 载波相位对超短脉冲时间重心开始有较显著的影响.

参考文献

- 1 Kaplan A E. Diffraction-induced transformation of near-cycle and subcycle pulses. *J Opt Soc Am B*, 1998, **15**(3): 951~955
- 2 Feng S, Winful H G. Spatiotemporal structure of isodiffracting ultrashort electromagnetic pulses. *Phy Rev E*, 2000, **61**(1): 862~873
- 3 Wang Z Y, Zhang Z Q, Xu Z Z, et al. Space-time profiles of an ultrashort pulsed Gaussian beam. *IEEE J Quant Electron*, 1997, **33**(4): 566~573
- 4 Wang Z Y, Xu Z Z, Zhang Z Q. Diffraction integral formulas of the pulsed wave field in the temporal domain. *Opt Lett*, 1997, **22**(6): 354~356
- 5 杨振军, 卢光山, 胡巍. 利用空间诱导色散补偿介质色散. *光学学报*, 2004, **24**(7): 916~921
Yang Z J, Lu G S, Hu W. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(7): 916~921
- 6 傅喜泉, 郭弘, 胡巍, 等. 超短脉冲光束传输缓变包络近似理论的失效和空间奇异性的形成与消除. *物理学报*, 2001, **50**(9): 1693~1698
Fu X Q, Guo H, Hu W, et al. *Acta Phys Sin*, 2001, **50**(9): 1693~1698
- 7 杨振军, 胡巍, 傅喜泉, 等. 超短啁啾脉冲光束空间奇异性的形成与消除. *物理学报*, 2003, **52**(8): 1920~1924
Yang Z J, Hu W, Fu X Q, et al. *Acta Phys Sin*, 2003, **52**(8): 1920~1924
- 8 Thomas B, Ferenc K. Nonlinear optical pulse propagation in the single-cycle regime. *Physical Review Letters*, 1997, **78**(17): 3282~3285
- 9 陆大全, 胡巍, 郑一周, 等. 自由空间中超短脉冲光束的非傍轴效应分析. *光子学报*, 2005, **34**(2): 180~183
Lu D Q, Hu W, Zheng Y Z, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(2): 180~183

- 10 楚晓亮,张彬. 超短脉冲在放大介质中传输特性研究. 光子学报,2004,33(6):641~644
Chu X L,Zhang B. *Acta Photonica Sinica*,2004,33(6):641~644
- 11 李淑青,李录,李仲豪,等. 含自频移啁啾超短脉冲间相互作用的数值研究. 光子学报,2004,33(7):862~866
Li S Q,Li L,Li Z H,*et al.* *Acta Photonica Sinica*,2004,33(7):862~866

Influence of Carrier Phase on the Center of Time Gravity of the Ultrashort Pulses

Yang Zhenfeng¹, Yang Zhenjun², Men Yanbin²

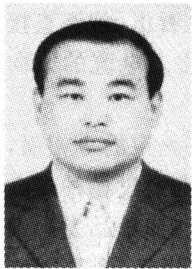
¹ School of Economics and Management, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018

² College of Physics, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050016

Received date:2004-12-07

Abstract The relation between the center of time gravity of the ultrashort pulse and the carrier phase was studied by using three kinds of pulses, named Gauss, Hyperbolic Secant and Lorentz pulses. The analytical expressions of the relation between them was deduced. The results show that the carrier phase affects the center of time gravity of the ultrashort pulse seriously when the pulsed width is shorter than the optical oscillation duration.

Keywords Ultrashort pulse; Carrier phase; Center of time gravity



Yang Zhenfeng was born in 1976, in Hebei Province, China. He received his M. S. degree from College of Information Science and Engineering of Yanshan University. His main research focuses on numerical simulation and computer calculation.