

文章编号: 0258-7025(2009)04-0809-05

激光脉冲系统时域响应的偏离度参数

申 恒 屈柯楠 金 晶 张蕾蕾 姜 萌 张伟刚

(南开大学现代光学研究所光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300071)

摘要 从理论上定义了基于高斯脉冲成分分析的激光脉冲时域响应的偏离度参数,并且通过实验验证了该定义的有效性。利用高速光电探测系统测量入射和出射的微秒量级激光脉冲的实际能量分布,在 3% 的容差范围内对能量分布进行高斯脉冲分量拟合,通过对比各独立高斯成分的归一化强度经系统后的理想值与真实值,计算得到偏离度。在该定义下,通过分析各高斯分量的权重演化以及新分量的成因,不仅可以研究光场与系统相互作用的物理机制,而且为系统的优化设计提供帮助。

关键词 激光脉冲; 偏离度; 高斯分量; 时域

中图分类号 TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093604.0809

Deviation Response Parameters of Laser Pulse System in Time Domain

Shen Heng Qu Kenan Jin Jing Zhang Leilei Jiang Meng Zhang Weigang

(*Key Laboratory of Opto-Electronic Information Science and Technology, Ministry of Education,*
Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071, China)

Abstract Based on the Gaussian pulse component analysis, a new deviation of laser pulse system in time-domain is defined, and its validity is further verified experimentally. The actual energy distribution of input and output optical pulses on microsecond level is gotten through high-speed photoelectric detector, and the envelopes of energy distribution is fitted by Gaussian pulse components with a tolerance range of 3%. Comparing ideal values with actual values of the independent Gaussian components after getting though the system, the deviations can be calculated. According to the definition, by analyzing the changes of existed components and the causes of new components, both the physical mechanisms of optics-system interaction and the optimization of system can be studied.

Key words laser pulse; deviation; Gaussian components; time domain

1 引 言

激光脉冲在光学系统中传播时,系统作用于该激光脉冲,可改变其在时域和频域的能量分布。为了实现激光脉冲的特定操作,研究者有针对性地设计系统,然而,由于系统内部的随机噪声和外部调制的不稳定,实际系统输出的光脉冲与理想情况往往存在一定的偏差。该偏差作为系统设计的关键依据,其定义方法在全面评估整体系统和辅助改进系统性能方面具有十分重要的意义。但是根据目前已有的报道,学术界对这种偏差尚无明确定义,一般仍

沿用经典统计理论中的方差 σ 以及由此衍生的一些参数。这种表征方式虽然计算简单,但作为一种统计结果,有其自身固有的局限性。

本文提出一种新型的基于高斯脉冲成分分析的偏离度参数定义方法。该定义不仅计算简单,而且可以通过各高斯分量的变化大小和趋势对物理成因进行分析验证,对系统进行优化。

2 理论模型及偏离度定义

考虑光场时域分布具有如下形式的高斯脉冲

收稿日期: 2008-12-09; **收到修改稿日期**: 2009-01-05

基金项目: 国家大学生创新实验计划项目(NK0720)资助课题。

作者简介: 申 恒 (1986—),男,本科生,主要从事量子光学研究。E-mail: shenheng.d.c@163.com

导师简介: 张伟刚 (1959—),男,教授,博士生导师,主要从事光子技术与现代光传感、新型光电子器件等方面的研究。

E-mail: zhangwg@nankai.edu.cn

$$u(t) = A \cdot \exp\left[-\frac{t^2}{2T_0^2}(1+iC)\right], \quad (1)$$

其中 A , T_0 和 C 分别为高斯脉冲的峰值强度、初始宽度和初始啁啾量。当该脉冲进入某一光学系统后,可以借助于系统的响应函数,通过简单的计算得到该系统输出端激光脉冲时域分布的理想解析解或数值解,即

$$u_{\text{out}}(t) = H(t) * u(t), \quad (2)$$

其中 $H(t)$ 为系统的时间响应函数, $u_{\text{out}}(t)$ 为系统输出脉冲的时域分布函数。

例如,考虑脉宽在百皮秒量级的高斯脉冲通过某一简单色散介质的情况(忽略损耗和非线性效应),色散对该量级脉冲的时域操作可通过微分方程表示为

$$i \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{1}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, \quad (3)$$

式中 β_2 为该色散介质的群速度色散(GVD)系数,若该色散介质长度为 L ,那么输出脉冲为^[1]

$$u(z, t) = A \sqrt{\frac{T_0^2}{T_0^2 - i\beta_2 L(1+iC)}} \times \exp\left\{-\frac{(1+iC)t^2}{2[T_0^2 - i\beta_2 L(1+iC)]}\right\}. \quad (4)$$

基于上述思想,可以将实际激光脉冲的时域包络看作是一系列独立高斯脉冲线性叠加的结果,即

$$u(t) = \sum_N u_i(t) = \sum_N a_i \times \exp\left[-\frac{t^2}{2T_{0i}^2}(1+iC_i)\right], \quad (5)$$

式中 a_i , T_{0i} 和 C_i 分别为第 i 个高斯分量的峰值强度、初始脉冲宽度以及初始啁啾量^[2]。借助已知的系统时域响应函数,分别得到这些高斯脉冲通过系统后的输出结果,线性叠加最终得到理想情况下系统总输出脉冲的时域分布结果,即

$$u_{\text{out}}(t) = H(t) * u(t) = H(t) * \sum_N u_i(t) = \sum_N H(t) * u_i(t). \quad (6)$$

在获得理想脉冲输出功率分布的情形下,通过与实测脉冲输出功率分布比对,就可以得到二者之间的偏差,这也就是文中定义的偏离度。

具体定义形式及获取方式如下:

1) 如(5)式所述,在根据实际光源以及系统情况所确定的容忍度范围内,将入射激光脉冲的时域包络分解成线性叠加的一系列独立高斯脉冲。将各高斯分量的脉冲宽度和初始啁啾分别用 T_i^{in} 和 C_i^{in} 表示;

2) 计算各高斯脉冲分量经过系统后的理想输

出结果,同时计算各理想分量在实际总脉冲能量中所占的比例。假设入射脉宽为 T_i^{in} 的高斯分量经系统后演变成了出射脉宽为 T_i^{out} 的理想分量不一定为高斯分布,其能量百分比为 P_i^{id} ;

3) 以脉宽为 T_i^{out} 的理想分量,从强度和相位上对实际出射脉冲的能量分布曲线及相位进行拟合,同时计算各拟合分量占实际总脉冲能量的比例,记为 P_i^{r} 。

最终,将偏离度参数 ϕ 定义为

$$\phi = \sqrt{\sum_N (P_i^{\text{id}} - P_i^{\text{r}})^2}. \quad (7)$$

这样,参数组 $\{P_i^{\text{id}}, P_i^{\text{r}}, \phi\}$, 无论从数学还是物理的角度,都可以清楚地描述实际脉冲输出结果与理想情况的偏差,不仅可以评价激光系统的性能,并且可以从各分量的权重演化以及新成分形成的角度,分析讨论光场与系统作用的物理机制,为该系统的优化设计提供帮助。

3 相关参数的测量方法

要获取新型偏离度参数,首先就要对实际脉冲进行高斯分解。该技术依赖于对初始激光脉冲光强 $I_{\text{in}}(t)$ 和初始啁啾量 C (或者初始相位 $\varphi(t)$) 的测量。对实际入射脉冲的表达式有

$$u_{\text{in}}(t) = U(t) \exp[i\varphi(t)], \quad (8)$$

式中

$$U(t) = \sum_N a_i \cdot \exp\left(-\frac{t^2}{2T_{0i}^2}\right). \quad (9)$$

而 $I_{\text{in}}(t) = u_{\text{in}}^*(t) u_{\text{in}}(t) = U(t)^2$, 光强 $I_{\text{in}}(t)$ 可以通过一般的高速光电探测系统测得。

关于初始相位的测量,对于百皮秒量级的激光脉冲可以采用条纹相机等电子技术进行测量,然而对于皮秒甚至飞秒脉冲就要依赖于建立在全光技术基础上的间接测量方法^[3]。常用的间接测量技术包括二次谐波法、双光子荧光法、频率分辨光学开关技术(FROG 技术)、自参考光谱相位相干电场重建法(SPIDER)等。其中二次谐波法是基于非线性倍频效应的二阶相关测量法,因而只能应用于低功率测量,而且要求满足相位匹配条件^[4]。常见的双光子荧光法也是一种利用双光子吸收与光强平方成正比的非线性效应,类似于二次谐波法的强度相关测量,该方法测量繁琐,分辨率低^[5]。频率分辨光选通(FROG)技术是 1993 年 Daniel J. Kane 等^[6,7]提出的,通过对 (ω, τ) 平面获得的典型自相关曲线进行重建而得到其初始光场振幅、相位的技术,但迭代算法

复杂,运算速度慢,不适合实时测量,而且给出的只是近似的脉冲信息。SPIDER 技术是 Chris Iaconis 提出的,把待测光脉冲的相位分布通过光谱相位干涉的形式表现为空间干涉条纹的强度,然后通过干涉图的计算来得到脉冲相位分布的技术。SPIDER 测量能够给出比较真实的相位信息,不需要迭代算法,运算速度快,可以进行实时测量,但是不能给出脉冲宽度。实验测得的初始相位 $\varphi(t)$, 经过简单的二次拟合得到

$$\varphi(t) = Pt^2 + Qt + \varphi_0, \quad (10)$$

其中 P 通过关系式 $C_i = P \cdot 2T_{0i}^2$ 转化为各高斯分量的初始啁啾量,而 Q, φ_0 分别是频率常数和初始相位常数。

4 实验验证

光脉冲通过低啁啾光纤 Bragg 光栅的实验被设计用于检验该偏离度参数定义的有效性,实验系统结构如图 1 所示。

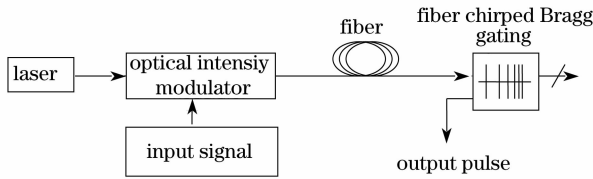


图 1 光纤 Bragg 光栅对光脉冲的反射实验框图

Fig. 1 Diagram of optical pulse reflection by fiber bragg grating (FBG)

实验使用连续可调激光器 (SANTEC TSL-2100), 通过配合信号发生器 (STANFORD RESEARCH SYSTEMS, INC DJ535) 以及光强度调制器 (世维通公司 SMAKFD645), 发射中心波长为 1560 nm, 脉宽为 12 ns 的激光脉冲。脉冲经光纤以及低啁啾光纤 Bragg 光栅 (其反射谱如图 2 所示) 后, 被 InGaAs 光电探测器探测 (THORLAB5 FG4), 最终显示在示波器 (YOKOWAGA DL9140) 上。

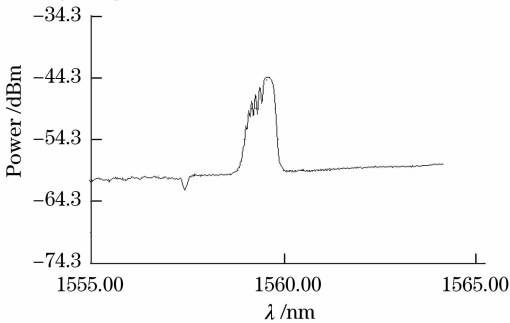


图 2 光纤 Bragg 光栅的反射谱

Fig. 2 Reflective spectrum of FBG

实验测得的实际入射脉冲如图 3 所示。因为入射脉冲的峰值功率为 35 mW, 非线性长度为 24 km, 而实验中所用的光纤长度不足 1 m, 远小于非线性长度, 所以可将该系统近似为忽略非线性效应和损耗的简单色散情况^[9]。由于实验设备的限制, 没有测量相位, 在仅对输出脉冲的能量进行拟合的条件下, 由相位分量缺失对实验结果带来的影响在 3% 的入射脉冲拟合容忍度范围内可以接受。

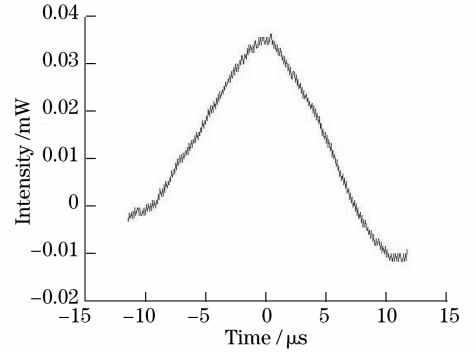


图 3 实际入射光脉冲的时域功率分布

Fig. 3 Actual input optical pulse in time-domain

将入射脉冲采用能量最大化原则进行高斯拟合, 可将脉冲分解为 $U(t) = \sum_N a_i \cdot \exp(-t^2/2T_{0i}^2) + \delta$ 的形式。在此实验中, 入射光脉冲被分解为

$$U_{in}(t) = P_1^{id} \exp\left[-\frac{(t - 1.1959 \mu s)^2}{2 \times (5.6893 \mu s)^2}\right] + P_2^{id} \exp\left[-\frac{(t + 1.2254 \mu s)^2}{2 \times (1.1929 \mu s)^2}\right] + \delta, \quad (11)$$

得到 $P_1^{id} = 92.72\%$, $P_2^{id} = 4.46\%$, $\delta < 3\%$ 。入射脉冲分解得到的高斯分量

$$u_1^{in}(t) = P_1^{id} \exp\left[-\frac{(t - 1.1959 \mu s)^2}{2 \times (5.6893 \mu s)^2}\right]$$

和

$$u_2^{in}(t) = P_2^{id} \exp\left[-\frac{(t + 1.2254 \mu s)^2}{2 \times (1.1929 \mu s)^2}\right]$$

如图 4 所示。

最终通过探测光栅的反射输出 (如图 5 所示), 忽略容差 δ , 解高斯脉冲在光纤中传输的非线性薛定谔方程得到理想的输出脉冲为

$$U_{out}(t) = P_1^{id} \exp\left[-\frac{(t - 1.2116 \mu s)^2}{2 \times (1.25433 \mu s)^2}\right] + P_2^{id} \exp\left[-\frac{(t + 0.35844 \mu s)^2}{2 \times (0.01787 \mu s)^2}\right]. \quad (12)$$

利用 $u_1^{out}(t) = P_1^{id} \exp\left[-\frac{(t - 1.2116 \mu s)^2}{2 \times (1.25433 \mu s)^2}\right]$ 和

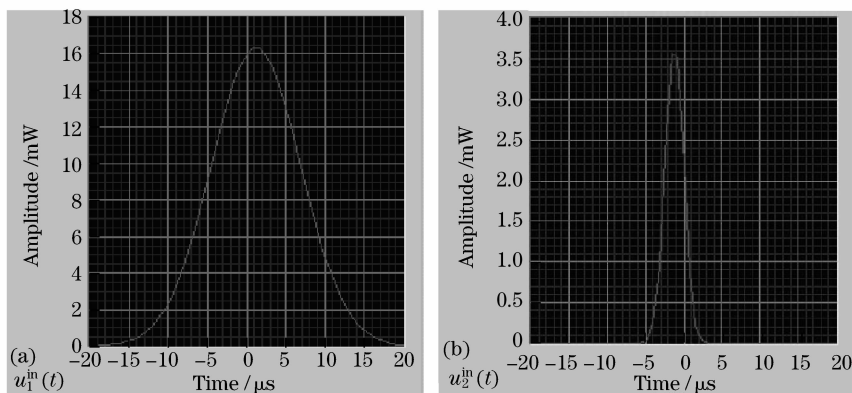


图 4 入射脉冲分解的高斯分量

Fig. 4 Gaussian components of input pulse

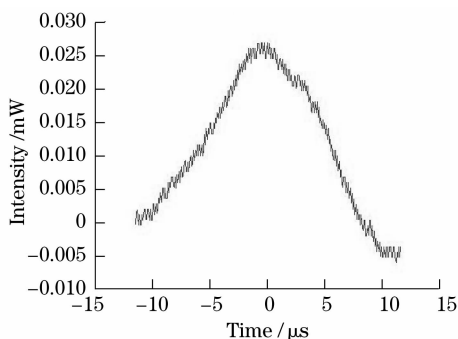


图 5 实际输出光脉冲

Fig. 5 Actual output optical pulse in time-domain

$u_2^{\text{out}}(t) = P_2^{\text{id}} \exp\left[-\frac{(t+0.35844 \mu\text{s})^2}{2 \times (0.01787 \mu\text{s})^2}\right]$ 对实际光脉冲输出进行非线性拟合

$$U_{\text{out}}(t) = P_1^{\text{r}} \exp\left[-\frac{(t-1.2116 \mu\text{s})^2}{2 \times (1.25433 \mu\text{s})^2}\right] + P_2^{\text{r}} \exp\left[-\frac{(t+0.35844 \mu\text{s})^2}{2 \times (0.01787 \mu\text{s})^2}\right] + \delta', \quad (13)$$

得到 $P_1^{\text{r}} = 95.95\%$, $P_2^{\text{r}} = 1.50\%$, $\delta' \approx 2.5\%$, 新分量 δ' 如图 6 所示。

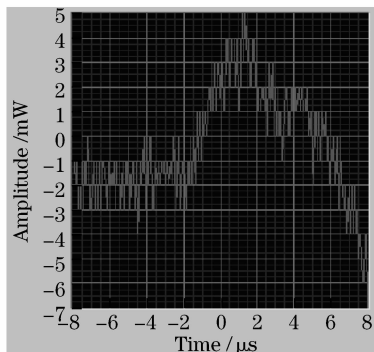


图 6 输出端新成分

Fig. 6 New components in output end

由此计算得到偏离度 $\phi = \sqrt{\sum \phi_i^2}$ 为 4.38%。

观察表 1 中实验所得数据, 不难发现通过实际系统后, 宽脉宽高斯分量的能量比例得到增长, 窄脉宽高斯分量所占比例相对衰减。这种现象可解释为: 光脉冲在时域脉宽越窄, 其频域的频谱越宽, 经过同一低啁啾光纤光栅的滤波作用^[10~13], 其能量损失越大, 因而其能量在整个脉冲中占的比例就越低^[14]。占总能量 2.5% 的新分量 δ' 可能是由于光纤光栅对线路中处于和光频接近处扰动的放大等效应的综合效应^[15]。

表 1 偏离度参数

Table 1 Parameters of deviation

$P^{\text{id}}/\%$	$P^{\text{r}}/\%$	$\phi_1/\%$	$\phi/\%$
92.72	95.95	3.23	4.38
4.46	1.50	-2.96	

5 结 论

引入了一种激光脉冲系统新的时域响应偏离度参数定义方法, 并且从理论上说明了其合理性, 从实例出发证明了其科学性。这种基于高斯脉冲成分分析的偏离度参数定义, 不仅可通过 MATLAB 和 LABVIEW 等软件辅助完成计算, 并且能够全面地反映脉冲能量时域分布变化, 从而可以据此对激光脉冲与系统相互作用过程进行物理分析与讨论, 进一步完善和优化激光系统性能。本文实例中, 设计实验测量了光脉冲强度在低啁啾光纤 Bragg 光栅传输中的变化, 说明了偏离度的计算过程并且尝试分析了造成脉冲分量变化的物理原因。由于实验条件所限, 只对相位测量技术进行了说明。

参 考 文 献

- Govind. P. Agrawal. Nonlinear Fiber Optics, Third Edition & Applications of Nonlinear Fiber Optics[M]. Jia Dongfang, Yu Zhenhong transl. Beijing: Publishing House of Electronics

- Industry, 2002. 41~47
- Govind. P. Agrawal. 非线性光纤光学原理及应用[M]. 贾东方, 余震虹译. 北京: 电子工业出版社, 2002. 41~47
- 2 F. Théberge, S. M. Sharifi, S. L. Chin. Simple 3-D characterization of ultrashort laser pulses [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(21): 10125~10131
 - 3 Claude. Rulliere. Femtosecond Laser Pulses. Principle and Experiment[M]. New York: Springer-Verlag, 1998. 177~201
 - 4 Yan Weizi, Sun Lijun, He Zhuorong. Measurement of ultrashort laser pulse by iphotonic autocorrelation [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2005, **3**(4): 61~64
颜微子, 孙力军, 何灼容. 双光子自相关测量超短脉冲激光技术的研究[J]. *光学与光电子技术*, 2005, **3**(4): 61~64
 - 5 Lan Xinju. Laser Technology[M]. Beijing: Beijing Science & Technology Press, 2005. 166~171
蓝信钜. 激光技术[M]. 北京: 北京科学技术出版社, 2005. 166~171
 - 6 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
 - 7 Kenneth W. DeLong, Rick Trebino. Improved ultrashort pulse-retrieval algorithm for frequency-resolved optical gating [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1994, **11**(9): 2429~2437
 - 8 Chris Iaconis, Ian A. Walmsley. Self-referencing spectral interferometry for measuring ultrashort optical pulses [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1999, **35**(4): 501~509
 - 9 Oleg V. Sinkin, Ronald Holzlöhner, John Zweck *et al.*. Optimization of the split-step Fourier method in modeling optical-fiber communications systems [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2003, **21**(1): 61~68
 - 10 Turan Erdogan. Fiber grating spectra [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1277
 - 11 Tang Shucheng. Numerical simulation of the reflective spectrum of a fiber grating [J]. *Modern Transmission*, 2002, (2): 23~28
汤树成. 光纤光栅谱特性的数值模拟 [J]. *现代有线传输*, 2002, (2): 23~28
 - 12 Xiao Zhigang, Li Bincheng. Combined multi- and single-mode fiber for laser beam relay transportation [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(6): 855~860
肖志刚, 李斌成. 多模与单模光纤级联系统对激光束的传输 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(6): 855~860
 - 13 Lu Shaohua, Xu Ou, Dong Xiaowei *et al.*. Analysis for the reflective spectrum characteristics of chirped phase-shifted fiber gratings [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(4): 577~581
鲁韶华, 许 鸥, 董小伟 等. 啁啾相移光纤光栅的反射谱特性 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(4): 577~581
 - 14 Li Bin, Liu Yan, Tan Zhongwei *et al.*. Linearly chirped fiber gratings using uniform phase mask [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(3): 414~418
李 彬, 刘 艳, 谭中伟 等. 利用均匀相位掩模板制作线性啁啾光纤光栅 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(3): 414~418
 - 15 Liu Changjun, Zhang Weigang, Jiang Meng *et al.*. Study on self-induced chirping for fiber Bragg grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(9): 1671~1674
刘长军, 张伟刚, 姜 萌 等. 光纤布拉格光栅自致啁啾效应的研究 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(9): 1671~1674