

文章编号: 0253-2239(2004)12-1697-4

带宽对脉冲贝塞尔光束传输的影响*

彭润伍 范滇元

(中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理国家重点实验室, 上海 201800)

摘要: 从惠更斯-菲涅耳衍射积分公式出发得到具有高斯型频谱分布的脉冲贝塞尔光束频率域的传输表示式, 并使用傅里叶变换最后推导了脉冲贝塞尔光束时间域的传输公式。根据得到的公式通过具体数值计算对脉冲贝塞尔光束在自由空间中的传输进行了研究。计算结果表明脉冲光束的带宽对脉冲贝塞尔光束传输中的脉冲时间延迟和脉冲宽度产生影响。具体表现为脉冲光束带宽的增宽使脉冲时间延迟增大, 并使脉冲时间波形的后沿拖长, 从而导致脉冲宽度增宽。脉冲时间延迟和脉冲宽度还随传输距离发生变化。脉冲光束传输距离越大, 脉冲时间延迟越大, 脉冲宽度变得越宽。

关键词: 物理光学; 高功率激光; 脉冲贝塞尔光束; 脉冲宽度; 带宽

中图分类号: O436; TN241 文献标识码: A

Effect of Bandwidth on Propagation of Pulsed Bessel Beams

Peng Runwu Fan Dianyuan

(State Key Laboratory of High-Power Lasers and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

(Received 30 December 2003; revised 12 May 2004)

Abstract: Starting from Huygens-Fresnel diffraction integral formula, propagation expression of pulsed Bessel beams with Gaussian spectrum in frequency domain is obtained. By using Fourier transform, propagation formula of the beams in temporal domain is derived. Based on the formula, propagation properties of the beams in free space are studied through numerical calculations. It is found that bandwidth of pulse has effects on time delay and pulse width. As bandwidth broadens, the time delay increases and temporal waveform changes, which results in increasing of pulse width. The time delay and pulse width also depend on propagation distance. Both of them increase when propagation distance increases.

Key words: physical optics; high-power laser; pulsed Bessel beam; pulse width; bandwidth

1 引 言

超短超强激光脉冲在物理、化学和生物等一些相关领域的广泛应用,使超短超强脉冲的产生、传输以及激光脉冲与物质相互作用的研究受到人们很大的关注^[1~11]。对于激光脉冲的产生,现有的激光技术已使脉冲光束从皮秒发展到了飞秒。脉冲宽度的减小使得脉冲频带宽度得到了很大增加,例如对于

中心波长 856 nm 的 8.5 ± 0.5 fs 超短脉冲,带宽达到约 150 nm^[4]。带宽增加会引起脉冲光束相关特性发生变化^[3~5],因此带宽对脉冲光束相关特性影响的研究是进一步了解激光脉冲的需要。Durnin 等人提出的具有无衍射特性的贝塞尔光束是长期以来人们非常感兴趣的光束^[5,6,12,13],这类无衍射光束实际上具有有限束宽、携带有限能量,主要特征是在其传输的最大准直范围内横截面上的光强分布随传输距离不变或者变化很小。实验中可以用多种方法得到贝塞尔光束,因而这类光束的研究有一定的实际意义。讨论这类光束中带宽产生的新问题是这类光束的进一步了解,这对贝塞尔光束在实际中的应

* 国家 863 计划(2004AA845010)惯性约束聚变委员会资助课题。

E-mail: pengrunwu@mail.siom.ac.cn

收稿日期:2003-12-30;收到修改稿日期:2004-05-12

用是必要的。

本文的主要内容是研究脉冲光束的带宽对脉冲贝塞尔光束在自由空间中传输的影响。从惠更斯-菲涅耳衍射积分公式出发并使用傅里叶变换,推导得到了脉冲贝塞尔光束在自由空间的传输公式。通过具体数值计算讨论了脉冲贝塞尔光束在不同带宽下的径向和时间波形,分析了带宽和传输距离对时间延迟以及脉冲宽度的影响。

2 脉冲贝塞尔光束的传输公式

对于亥姆霍兹方程

$$(\nabla^2 + k^2)E = 0, \quad (1)$$

具有无衍射特性的贝塞尔光束是其在自由空间中的

一个特解^[12],式中 $k = \omega/c$ 是波数。 $z = 0$ 处贝塞尔光束可表示为

$$E_0(r_0) = J_0(\alpha r_0), \quad (2)$$

其中 J_0 是零阶贝塞尔函数, α 是相关的空间参量(在初始时间空间可分离时 α 是与频率无关的常量)。具有高斯形频谱分布的脉冲贝塞尔光束的形式为

$$E_0(r_0, \omega) = \frac{\tau}{\sqrt{2\pi}} J_0(\alpha r_0) \exp\left\{-\frac{[(\omega - \omega_0)\tau]^2}{2}\right\}, \quad (3)$$

式中 τ 是脉冲贝塞尔光束的脉冲宽度, ω_0 是脉冲光束中心频率。

在柱坐标系下,由惠更斯-菲涅耳衍射积分公式可得光束在旋转对称情况下自由空间传输距离 z 处的形式为^[14]

$$E(r, z, \omega) = -\frac{i\omega}{cz} \exp\left(i\frac{\omega z}{c}\right) \int_0^\infty E_0(r_0, \omega) J_0\left(\frac{\omega r r_0}{cz}\right) \exp\left[\frac{i\omega}{2cz}(r_0^2 + r^2)\right] r_0 dr_0, \quad (4)$$

积分可得

$$E(r, z, \omega) = -\frac{\tau}{\sqrt{2\pi}} J_0(\alpha r) \exp\left\{\frac{i\omega z}{c}\left[1 - \frac{1}{2}\left(\frac{c\alpha}{\omega}\right)^2\right]\right\} \exp\left\{-\frac{[(\omega - \omega_0)\tau]^2}{2}\right\}. \quad (5)$$

对 $E(r, z, \omega)$ 作逆傅里叶变换

$$E(r, z, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} E(r, z, \omega) \exp(-i\omega t) d\omega, \quad (6)$$

得到时间域表示式

$$E(r, z, t) = -\frac{\tau}{\sqrt{2\pi}} J_0(\alpha r) \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left[-i\left(\frac{\eta}{\xi} + \frac{\xi T}{\gamma}\right)\right] \exp\left[-\frac{(\xi - 1)^2}{2\gamma^2}\right] d\xi, \quad (7)$$

其中

$$\xi = \frac{\omega}{\omega_0}, \quad \eta = \frac{c\alpha^2}{2\omega} z, \quad T = \frac{t - z/c}{\tau}, \quad (8)$$

并有

$$\gamma = 1/(\omega_0 \tau), \quad (9)$$

γ 表示脉冲带宽。光束的光强分布由(7)式得到

$$I(r, z, t) = \frac{\tau^2}{2\pi} J_0^2(\alpha r) \left| \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left[-i\left(\frac{\eta}{\xi} + \frac{\xi T}{\gamma}\right)\right] \exp\left[-\frac{(\xi - 1)^2}{2\gamma^2}\right] d\xi \right|^2. \quad (10)$$

3 计算分析

在不同的脉冲带宽下,脉冲贝塞尔光束有着不同的波形。如图 1 是传输距离 $z = 0.3$ mm 处脉冲贝塞尔光束在脉冲带宽分别为 0.06、0.15 和 0.32 时的径向和时间波形。图 1 表明不同带宽的脉冲贝塞尔光束传输到 $z = 0.3$ mm 处都产生了时间延迟。比较图 1,可以看出脉冲时间延迟随带宽增宽而增

大,并且脉冲宽度出现增宽的现象。图 2 和图 3 给出了脉冲光束时间延迟和脉冲宽度随带宽变化的具体数据关系。

图 2 是传输距离 $z = 0.1$ mm, 0.3 mm, 1 mm 处时间延迟随带宽的变化,计算参量为 $\omega_0 = 2.98$ fs⁻¹, $\alpha = 1100$ mm⁻¹。图中纵坐标表示的是光强峰值对应的相对时间延迟 T_{\max} ,即(8)式中光强取得最大值时的时间与脉冲宽度的比值 T 。从图 2 可看出,随带宽

增宽时间延迟增大,传输距离的增大同样引起时间延迟增大。时间延迟随传输距离有较大的增大幅度,例

如带宽 0.2 时 0.1 mm 处 T_{max} 为 1.3,而同样带宽时 1 mm 处 T_{max} 为 11。

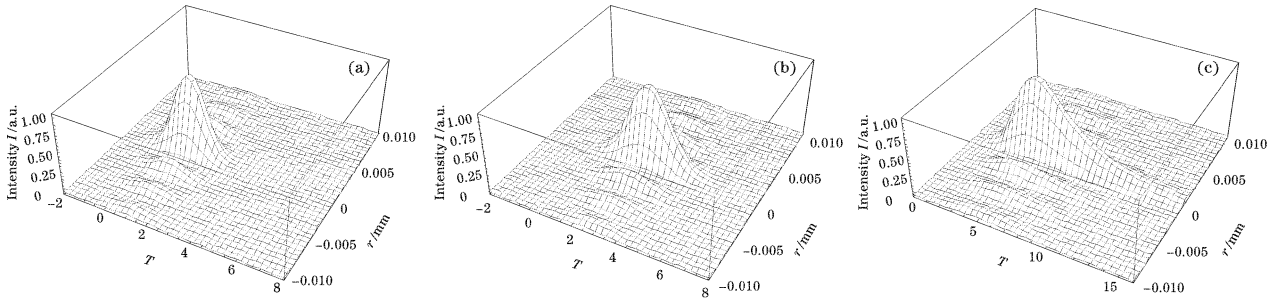


Fig. 1 Radial and time shape of pulse Bessel beams at distance $z=0.3$ mm. (a) $\gamma=0.06$, (b) $\gamma=0.15$, (c) $\gamma=0.32$

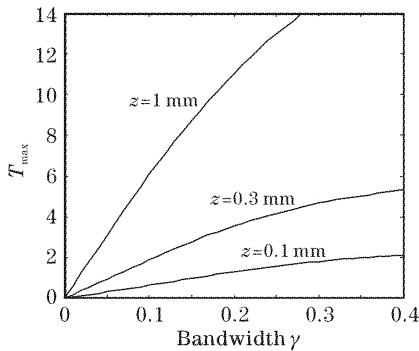


Fig. 2 Relative time delay of pulsed Bessel beams versus bandwidth

图 3 是传输距离 $z=0.1$ mm, 0.3 mm, 1 mm 处脉冲宽度随带宽的变化,计算参量同图 2。图中纵坐标表示的是相对脉冲宽度 τ' , τ' 是任意距离处的脉冲宽度与 $z=0$ 处脉冲宽度的比值。由于脉冲波形的变化,尤其是带宽较大时脉冲后沿变缓,半峰全宽定义的脉冲宽度才准确反映出脉冲变化,所以计算中的脉冲宽度都使用半峰全宽的脉冲宽度。从图 3 可看出,带宽增宽和传输距离增大使脉冲宽度增宽。但在传输距离 0.1 mm、0.3 mm 和 1 mm 处带宽分别小于 0.15、0.1 和 0.05 时脉冲宽度几乎不随带宽发生改变。显然,随传输距离的增大,使脉冲

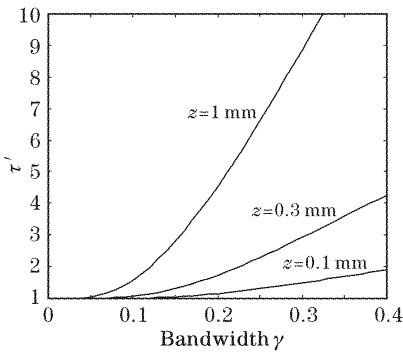


Fig. 3 Relative pulsewidth of pulsed Bessel beams versus bandwidth

宽度不随带宽发生改变的带宽值会减小。传输距离较小时,脉冲宽度随带宽的变化量较小,然而传输距离较大时,脉冲宽度随带宽增宽迅速增大。例如带宽 0.3 时 0.1 mm 处脉冲宽度仅为初始脉冲宽度的 1.5 倍,而同样带宽时 1 mm 处已增大为约 9 倍。

脉冲宽度随带宽和距离的这种变化可以从光波不同的频谱分量有着略微不同的传播速度得到解释^[1]。长波长的频谱分量比短波长的频谱分量传播速度要稍大。带宽越宽时光波频谱成份越丰富,因此频谱分量传播速度差值也就越大,从而导致传输距离越大脉宽变得越宽。与窄带光束相比较,宽带光束还具有复杂的时空耦合现象。这可从文中仅考虑线性衍射时得到的光束传输表示式中看出。(7) 式中前一个指数函数的指数部分可改写为 $-i\omega\left(t - \frac{z}{c} + \frac{\alpha^2}{2k^2} \frac{z}{c}\right)$,可以看出自变量中存在依赖于空间变量的时间移动,从而产生时空耦合现象。

结论 脉冲贝塞尔光束在自由空间传输时,脉冲光束带宽和传输距离的变化使脉冲产生不同的时间延迟,并且脉冲宽度也会发生变化。脉冲光束的带宽增宽使脉冲时间延迟增大,并且脉冲光束时间波形后沿变缓,尾部拖长,从而导致脉冲宽度变宽。光束的传输距离增大同样会使脉冲光束时间波形发生变化。脉冲光束传输得越远,光束时间延迟越大,并且脉冲宽度变得越宽。在带宽较小的情况下,脉冲宽度几乎不随带宽发生改变。随着超短脉冲激光在许多领域的广泛应用,这些结果对具有无衍射特性脉冲贝塞尔光束的实际应用有着一定的参考意义。

参 考 文 献

1 Christov I P. Propagation of femtosecond light pulses. *Opt. Commun.*, 1985, **53**(6): 364~366
 2 Maine P, Strickland D, Bado P *et al.*. Generation of

- ultrahigh peak power pulses by chirped pulse amplification. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1988, **24**(2): 398~403
- 3 Ziolkowski R W, Judkins J B. Propagation characteristics of ultrawide-bandwidth pulsed Gaussian beams. *J. Opt. Soc. Am. (A)*, 1992, **9**(11): 2021~2030
- 4 Zhou J P, Taft G, Huang C P *et al.*. Pulse evolution in a broad-bandwidth Ti:sapphire laser. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(15): 1149~1151
- 5 Liu Z Y, Fan D Y. Propagation of pulsed zeroth-order Bessel beams. *J. Modern Opt.*, 1998, **45**(1): 17~21
- 6 Sheppard C J R. Bessel pulse beams and focus wave modes. *J. Opt. Soc. Am. (A)*, 2001, **18**(10): 2594~2600
- 7 Porras M A. Diffraction effects in few-cycle optical pulses. *Phys. Rev. (E)*, 2002, **65**(2): 026606-1~026606-11
- 8 Zhong Fangchuan, Hu Xueyuan, Deng Jian *et al.*. Third harmonic generation in air through interaction with ultrashort intense laser pulses. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(1): 10~13 (in Chinese)
- 9 Zhang Zhengyu, Zhou Shouhuan, Sui Xiaolin. Study on time-domain broadening of submarine laser pulse. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2003, **23**(7): 850~854 (in Chinese)
- 10 Ni Xiaochang, Wang Chingyue, Wang Zhuan *et al.*. The study of nanojoule femtosecond laser ablation on organic glass. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(7): 429~431
- 11 Wang Anbin, Wu Jian, Gong Wei *et al.*. Experimental study on generation of ultra-short optical pulse with high extinction ratio. *Chin. J. Lasers* (中国激光), 2004, **31**(3): 265~268 (in Chinese)
- 12 Durnin J, Miceli J J, Eberly J H. Diffraction-free beams. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(15): 1499~1501
- 13 Chattapiban N, Rogers E A, Cofield D *et al.*. Generation of nondiffracting Bessel beams by use of a spatial light modulator. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(22): 2183~2185
- 14 Born M, Wolf E. *Principles of Optics*. 7th. ed., Cambridge: Cambridge University Press, 1999. 412~430

更 正

本刊2004年24卷11期第1557页文章“一维光子晶体掺杂缺陷模研究”增加基金资助项目为:“江苏省自然科学基金(BK2004059)”,特此更正。

《光学学报》编辑部