

文章编号: 1001-3806(2013)01-0052-04

基于短时傅里叶变换分析超短光脉冲的传输特性

张景贵^{1,2} 李勇帆¹ 赵晋琴¹

(1. 湖南第一师范学院 信息科学与工程系,长沙 410205; 2. 湖南大学 计算机与通信学院 微纳光电器件及应用教育部重点实验室,长沙 410082)

摘要: 短时傅里叶变换可将 1 维时域或频率信号扩展到时间-频率的 2 维平面。为了研究了光纤中的色散效应与脉冲的初始啁啾对信号传输的影响,采用短时傅里叶变换理论进行了分析。与传统傅里叶变换相比,短时傅里叶变换可以更直观地描述光纤的色散效应与脉冲的初始啁啾如何影响信号的时域与频率的传输特性;此外,从短时傅里叶变换的时频分析图还可以很清晰地观察到在脉冲传输过程中,由色散效应与脉冲的初始啁啾所诱导的新的频率啁啾的演化规律。结果表明,短时傅里叶变换克服了传统的傅里叶变换法只能单独在频率或时域中比较信号的瞬态特性缺点,为分析光纤中脉冲信号的传输提供了一种新途径。

关键词: 光电子学; 短时傅里叶变换; 时频分析; 色散; 啁啾

中图分类号: O437 **文献标识码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2013.01.013

Study on the characteristics of ultra-short optical pulse propagation based on short-time Fourier transformation

ZHANG Jing-gui^{1,2}, LI Yong-fan¹, ZHAO Jin-qin¹

(1. Department of Information Science and Engineering, Hunan First Normal College, Changsha 410205, China; 2. Key Laboratory for Micro/Nano Optoelectronic Devices of Ministry of Education, School of Computer and Communication, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Short-time Fourier transformation is widely used to expand 1-D signal in temporal domain or spectral domain into the corresponding 2-D case in time-frequency domain. Effect of dispersion and initial chirp of pulse in fiber on signal propagation was numerically analyzed in detail by employing short-time Fourier transformation. Compared with conventional Fourier transformation, short-time Fourier transformation can more directly describe how the temporal and spectral features of optical pulse evolution vary with both dispersion and initial chirp. In addition, the evolutions of new frequency chirp induced by both dispersion and initial chirp can be clearly seen by using time-frequency analysis resulting from short-time Fourier transformation. Therefore, it completely overcomes the disadvantage of conventional Fourier transformation that is used to only compare signal transient in the spectral or temporal domain separately, and short-time Fourier transformation is expected to provide a new and effective approach to analyze the pulse propagation in fiber.

Key words: optoelectronics; short-time Fourier transformation; time-frequency analysis; dispersion; chirp

引 言

时频分析就是同时在时域与频率描述信号,这种描述方法已广泛应用于处理时变的非平稳的信号,如声学、通信、雷达、遥感、电磁学、医疗诊断等。由于光脉冲信号也可以看作一种非平稳信号,所以可以用处

基金项目: 湖南省科技计划资助项目(2010GK3049); 湖南省普通高等学校教学改革研究课题资助项目(2011(462)); 湖南省高校科技创新团队计划资助项目(湘教通[2010]212号)

作者简介: 张景贵(1977-),男,博士后,主要从事超短脉冲传输的研究。

E-mail: zjg51@163.com

收稿日期: 2012-02-20; 收到修改稿日期: 2012-03-22

理非平稳信号的方法来研究光脉冲在光纤中的传输。光信号在光纤中传输遵守非线性薛定谔方程^[1],色散、啁啾、非线性以及损耗等是制约光脉冲在光纤中传输的主要因素。随着传输距离增加,不同频率的光脉冲发生不同的变化,为了全面了解光脉冲信号频率随时间的变换情况,从时间与频率 2 维坐标去观察光脉冲将更直观理解其变化情况,国内有人提出了联合时频分析法研究了脉冲信号在平面传输线、单模光纤、等离子体等媒质上传输情况^[2-8]。国外有学者提出了利用维格纳-威利函数分析超短脉冲传输特性^[9]以及利用时频分析方法研究光脉冲压缩原理^[10],还有人利用短时傅里叶变换(short-time Fourier transformation, STFT)分析微带传输线上信号时频特性^[11]。

近年发展起来的常用时频分析方法主要分为两类: (1) 线性时频表示, 如短时傅里叶变换、加伯变换与小波变换等; (2) 非线性时频表示, 如维格纳-威利分布。目前广泛应用的是维格纳-威利分布变换与短时傅里叶变换两种时频分析方法, 维格纳-威利分布变换对于分析线性调频信号十分有利, 具有很好的时频聚集性, 但是缺点是由于这种变换是非线性变换, 分析多分量信号与非线性调频信号时存在严重的交叉项^[7], 虽然通过平滑技术可以减少交叉项的干扰, 这些采用固定核函数的时频分析方法, 可以对某些特定的信号产生良好的时频分析, 但是以牺牲时频聚集性为代价, 且不能适应所有信号形式, 即使是单分量信号, 维格纳-威利分布也是存在干扰项, 在相关的文献中已有报道^[8], 而传统的短时傅里叶变换是线性变换, 不存在交叉项的干扰, 其时频分辨率依赖于窗函数选择的类型以及窗函数的参量, 所以通过选择合适的窗函数、窗函数的参量来控制信号的时间分辨率与频率分辨率, 使其达到理想状态, 且短时傅里叶变换物理概念清楚、实现简单、计算量小。所以本文中提出了基于短时傅里叶变换研究光纤中脉冲信号的时频特性研究。

1 短时傅里叶变换基本理论

短时傅里叶变换是研究非平稳信号最广泛使用的方法, 它建立在传统傅里叶变换的基础上, 其基本思想是引入一个具有时频局域性的窗函数 $\gamma(t)$, 让它沿信号滑动, 对每一段被窗口截取的信号实行傅里叶变换, 由于滑动窗函数的位置引入了时间的信息, 可以得到一个时变的频率分析结果, 这样信号 $s(t)$ 的短时傅里叶变换定义为^[12]:

$$\text{STFT}(t, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(\tau) \gamma^*(\tau - t) \exp(-j\omega\tau) d\tau \quad (1)$$

式中, $*$ 代表复数的共轭, ω 为脉冲角频率, 短时窗 $\gamma^*(\tau - t)$ 有效地把信号限制在分析时间 $\tau = t$ 附近输出。短时傅里叶变换是信号 $s(t)$ 在时间 t 附近的一个局部的频谱。对于两种特殊情况, 当窗函数选择狄拉克函数:

$$\gamma(t) = \delta(t) \Rightarrow \text{STFT}(t, \omega) = s(t) \exp(-j\omega t) \quad (2)$$

此时短时傅里叶变换具有非常好的时间分辨率, 但是很难提供较好的频率分辨率。当窗函数选择常函数的时候, 此时短时傅里叶变换变成了信号的傅里叶变换, 它具有很好的频率分辨率, 但是它不提供任何时间分辨率:

$$\gamma(t) = 1 \Rightarrow \text{STFT}(t, \omega) = s(\omega) \quad (3)$$

短时傅里叶变换有很多优良性质^[12], 它具有线性、时移不变性、频移不变性、带通性、低通性、计算量小、其值取

模的平方代表了信号在时频面上的能量的分布情况, 这些性质为研究光脉冲信号传输提供了理论依据。

2 光纤中光脉冲传输的时频特性研究

利用短时傅里叶变换研究脉冲传输的时频特性。窗口函数通常为低通型, 其常见类型分为矩形窗、汉明窗与升余弦窗等, 本文中采用具有平滑性质的汉明函数作为时间窗函数。对窗口函数的宽度的选择也很重要, 一方面要窄的窗口才能保证窗口函数的局部平滑, 另外一方面要选择较宽的窗函数, 以提高频率分辨率, 如何处理这个矛盾成为解决问题的关键。由于脉冲在光纤中传输受色散作用的影响, 在时域上脉冲将不断展开, 所以应根据实际情况调整窗口函数的参量, 才能够得到比较理想的结果。仿真结果表明, 通过不断调整窗口函数的参量使短时傅里叶变换能很好的描述光脉冲在光纤中的传输的时域与频域特性。

2.1 2 阶色散的影响

图 1 是无初始啁啾超高斯脉冲传输的时频分析图, 图 1a ~ 图 1d 分别对应光脉冲处在 $z = 0$, $z = L_d$, $z = 2L_d$, $z = 4L_d$ 位置, 其中 L_d 为光纤色散长度^[1]。每一个图的中间部分对应信号时频图, 下部对应信号时域图, 左边部分对应信号频谱图, 其幅值均已归一化, 并以颜色深浅的变化表示不同时间、不同频率所对应的光脉冲信号的能量。设输入脉冲为超高斯脉冲则其表达式为^[1]:

$$u(0, t) = \exp[-(1/2)(t/T_0)^{2m}] \quad (4)$$

假设输入超高斯脉冲的阶数 $m = 3$, 超高斯脉冲的宽度 $T_0 = 3\text{ps}$, 并且假设光纤处于反常群速度色散区, 忽略光纤的非线性效应及高阶色散效应, 则脉冲在光纤中传输时, 其频率中复振幅 $\tilde{u}(z, \omega)$ 可表示为^[1]:

$$\tilde{u}(z, \omega) = \tilde{u}(0, \omega) \exp(j\beta_2 z \omega^2 / 2) \quad (5)$$

式中 β_2 为 2 阶函数余数, z 为信号在光纤中脉冲传输距离。在图 1a 中, 由于传输距离为 0, 脉冲所有频谱的群延时相同, 所以脉冲能量在时频面上成对称分布, 随着脉冲在光纤中的传输(见图 1b ~ 图 1d, 图中 ω_0 为脉冲中心频率), 脉冲不同频率分量具有不同的传播速度, 脉冲的高频分量出现在脉冲的前沿, 低频分量出现在脉冲的后沿, 这是由反常色散导致脉冲呈现负的频率啁啾特性。随着传输距离的增大, 高频分量与低频分量产生的延时差明显, 当脉冲传输一定的距离之后, 光脉冲在时频面上的能量分布近似成一条直线, 此时脉冲的线性啁啾特性变的更加明显, 最终, 由于 2 阶色散效应的作用, 一个无初始频率啁啾的脉冲, 在光纤中经过一段距离传输之后, 完全变成一个具有线性频率啁啾的光脉冲。

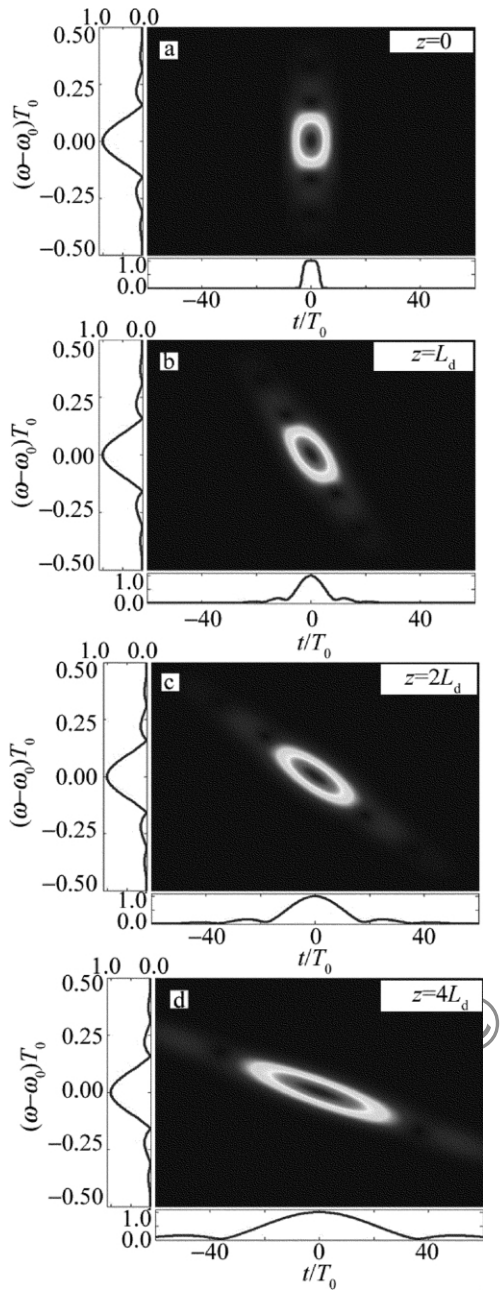


Fig. 1 Time-frequency analysis of the evolution of nonchirped pulse(only including the second-order dispersion)

2.2 3 阶色散的影响

若入射光波长在光纤零色散波长附近, 2 阶色散近似为 0, 此时 3 阶色散不能忽略, 图 2 中分析了无初始啁啾超高斯脉冲传输的短时傅里叶变换时频特性。假设 3 阶色散系数 β_3 为负, 忽略光纤的非线性效应, 并且假设输入的初始脉冲为无啁啾的超高斯脉冲, 即为 (4) 式, 则频率中光脉冲包络振幅 $\tilde{u}(z, \omega)$ 随传输距离变化的表达式为^[1]:

$$\tilde{u}(z, \omega) = \tilde{u}(0, \omega) \exp(j\beta_3 z \omega^3 / 6) \quad (6)$$

从图 2 时域图中可以看出, 随着传输距离的增大, 3 阶色散效应最明显的特征是在光脉冲的后沿出现振荡拖尾结构, 结合脉冲时频图可以很直观地理解引起

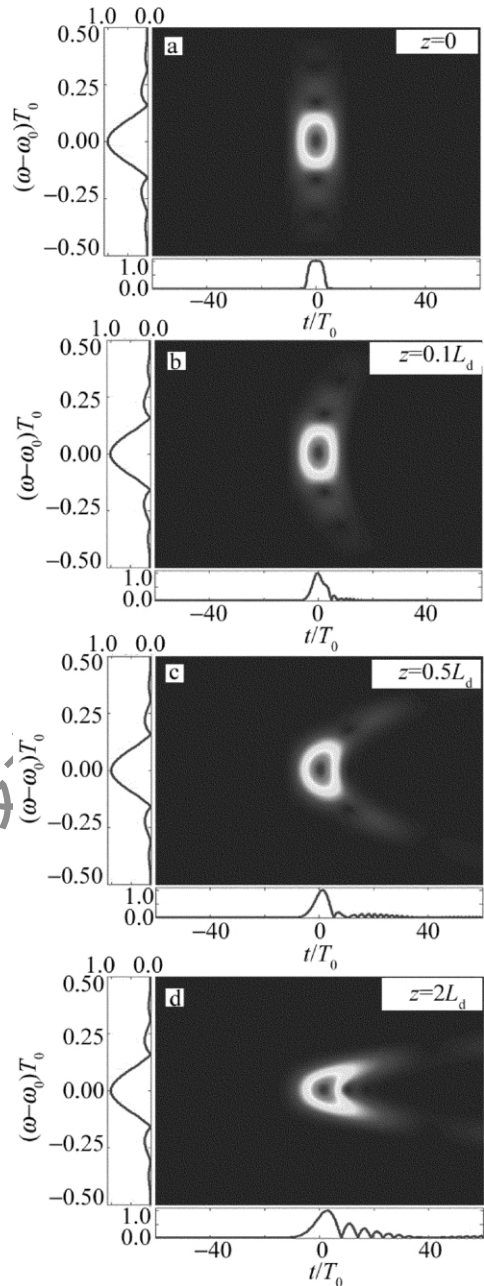


Fig. 2 Time-frequency analysis of the evolution of nonchirped pulse(only including the third-order dispersion)

这一现象的原因。由 3 阶色散效应的影响, 脉冲的中心附近频率分量仍然出现在脉冲的中心附近, 远离中心频率高频与低频将同时出现在脉冲后沿, 此时高频与低频分量相互叠加从而导致在脉冲后沿形成振荡, 且离中心频率越远的频谱分量传播速度越慢, 此外, 从图中还可以发现, 在脉冲前沿其啁啾为正值, 而脉冲后沿其啁啾为负值, 且两者近似表现为线性特性。

2.3 初始啁啾的影响

图 3 中分析了具有初始啁啾超高斯脉冲传输的短时傅里叶变换的时频特性, 假设输入脉冲的初始啁啾参量 $C = 3$, 其它参量与图 1 相同, 忽略光纤的非线性效应及高阶色散效应, 则具有初始啁啾的超高斯脉冲

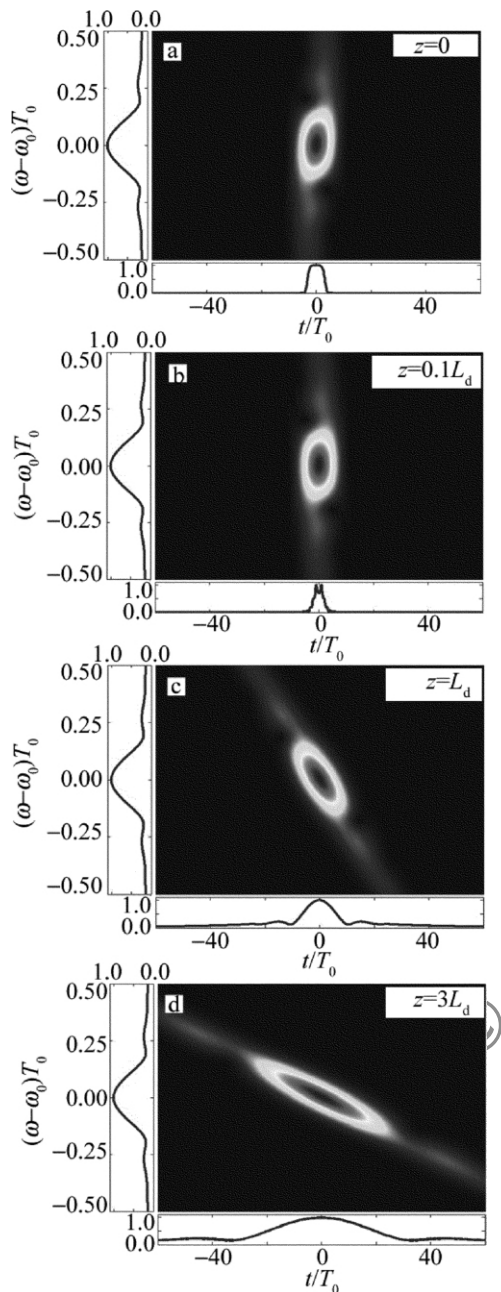


Fig. 3 Time-frequency analysis of the evolution of initial chirped pulse 信号时域表达式可以表示为^[11]:

$$u(0, t) = \exp \left[(-1 + Cj) \left(t/T_0 \right)^2 / 2 \right] \quad (7)$$

在图 3a 中, 尽管信号时域图与无初始啁啾的脉冲一样, 由于输入脉冲带有初始啁啾导致不同频率成分具有不同的群延时, 所以它的时频图结构与无初始啁啾的不同, 成为非对称结构, 由图 3 可以看出, 脉冲高频分量分布在脉冲的后沿, 而低频分量分布在脉冲的前沿, 在光脉冲传输到 $z = 0.1L_d$ 处, 由于光纤色散作用, 不同频率分量具有不同的传播速度, 使脉冲的高频与低频分量都向脉冲中心移动, 从而导致脉冲的压缩, 当光脉冲传输到一定的距离时, 脉冲到达最大压缩量, 随着脉冲传输距离的继续增大, 脉冲高频分量将向脉冲前沿移动, 低频分量将向脉冲后沿移动, 从而导致脉冲

的展宽。当传输到一定距离之后, 光脉冲在时频面上能量分布近似成一条直线, 因此由于反常群速度色散效应的作用, 光脉冲产生了线性频率啁啾, 且其值是负的, 见图 3c 与图 3d。

3 结 论

首先阐述短时傅里叶变换的一些基本理论, 然后利用其原理分析脉冲在光纤中的传输的时频特性, 重点讨论 2 阶色散、3 阶色散及信号初始啁啾对脉冲传输的影响。研究发现, 短时傅里叶变换能够帮助理解光纤中光脉冲信号随频率与时间的变化关系以及其时频面上能量分布情况, 它克服了传统的傅里叶变换法只能在频率或时域比较信号的瞬态特性缺点。此外, 从短时傅里叶变换的时频分析图还可以观察到在脉冲传输过程中由两者所诱导的新的频率啁啾的演化规律。因此, 短时傅里叶变换为分析光纤中脉冲信号的传输特性提供了一种有效的途径。

参 考 文 献

- [1] AGRAWAL G P. Nonlinear fiber optics [M]. 4th ed. San Diego, USA: Academic Press, 2007: 26-76.
- [2] GUO A H, FU J M. Time-frequency characteristics of pulsed light transmission through singlemode fiber [J]. Acta Electronica Sinica, 2002, 30(3): 416-418 (in Chinese).
- [3] DONG X T, LIU Y X, WANG W B. Time-frequency characteristics of pulse propagation through plasma [J]. Systems Engineering and Electronics, 2000, 22(8): 31-33 (in Chinese).
- [4] LI J, JIN L, FU J M. Joint time-frequency representation of transient pulses in planar transmission lines [J]. Journal of Microwaves, 1998, 14(4): 283-287 (in Chinese).
- [5] LIU S G, LI Z R, LIU Q. Study of self-mixing interference signal processing based on time-frequency analysis [J]. Laser Technology, 2009, 33(6): 626-629 (in Chinese).
- [6] WANG X Q, DONG Y Q, YUAN Sh, et al. Study on simulation of micro-Doppler effect in lidar [J]. Laser Technology, 2007, 31(2): 117-119 (in Chinese).
- [7] WANG Z R, LIN J, LI W W. Time-frequency analysis for complex time-varying signals based on wigner-ville distribution [J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(12): 2239-2241 (in Chinese).
- [8] WANG B, YANG J Y, XIONG J T. A improved method of analysis of nonstationary signal [J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2004, 33(1): 9-11 (in Chinese).
- [9] PAYE J. The chronocyclic representation of ultrashort light pulses [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1992, 28(10): 2262-2273.
- [10] PINTO-ROBLEDO V J, HALL T A. Chronocyclic description of laser pulse compression [J]. Optics Communication, 1996, 125(15): 338-348.
- [11] KUNASANI S R, NGUYENJ C. Distortion of pulsed signal in microstrip transmission lines using short-time Fourier transform [J]. IEEE Microwave and Guided Wave Letters, 1996, 6(1): 1-3.
- [12] COHEN L. Time-frequency distribution—a review [J]. Proceedings of IEEE, 1989, 77(7): 941-981.