

# 单模光纤中光脉冲传输的时频特性

郭爱煌, 傅君眉

(西安交通大学电子与信息工程学院微波工程与光通信研究所, 陕西西安 710049)

**摘要:** 计算了有无初始啁啾的高斯光脉冲信号在单模光纤中传输不同距离的波形, 并用时频分析方法将光脉冲信号扩展到时间-频率的二维平面, 通过时间窗、频率窗和 Wigner Vill 分布的时频平面对高斯光脉冲的传输特性进行了分析. 时频分析方法可以更直观和更清晰地了解光脉冲信号在传输过程中色散和能量的变化.

**关键词:** 单模光纤; 光脉冲; 时频分析

**中图分类号:** TN929.11 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2002) 03-0416-03

## Time-Frequency Characteristics of Pulsed Light Transmission Through Singlemode Fiber

GUO Ai huang, FU Jun mei

(Xi'an Jiaotong University, Microwave Engineering and Optical Communication Institute, Xi'an, Shaanxi 710049, China)

**Abstract:** In this paper, the transmitted waveforms of a Gaussian pulsed light with or without initial chirp at different distances in a singlemode fiber are calculated, and the transmission characteristics are analyzed through time window, frequency window, and time-frequency plane of the Wigner-Vill distribution by using time-frequency analysis. Time-frequency analysis can provide more information about the dispersion and energy changes on the pulsed light transmission through the singlemode fiber.

**Key words:** singlemode fiber; pulsed light; time-frequency analysis

### 1 引言

应用时频分析和小波分析研究电磁信号在复杂导波系统和不同媒质中的传输特性, 是目前电磁信号处理的一个热点. 特别是时频分析, 克服了传统的信号处理方法傅立叶变换在所有时间周期内对信号做相同的处理、不能很好地描述频率随时间变化的信号特征的不足, 能够将一维时域信号或一维频域信号拓宽成以时间和频率为变量的二维函数, 联合时间和频率的二维域分析准确地反映信号随时间和频率变化的情况, 在分析非平稳信号和时变信号方面有独特的作用, 得到了较为广泛的应用. 国外 Kunasani S R, Ling H 和 Tritinalia L C 等人在 IEEE Transaction on Antennas and Propagation 和 Signal Processing Magazine 等刊物上发表了一系列关于微带<sup>[1]</sup>, 波导<sup>[2]</sup>结构色散特征和电磁散射信号处理<sup>[3]</sup>的时频分析文章, 对特殊结构的电磁波色散特征和散射特征进行了较为深入的研究; 国内研究人员对脉冲信号在平面传输线上<sup>[4]</sup>和等离子体中<sup>[5]</sup>传输的时频特性也进行了分析. 尽管针对研究的问题不同采用具体的时频分析方法各异, 如短时傅立叶变换、Choi-William 分布、Wigner-Vill 分布、自适应谱分析等, 但对问题的解决都取得了良好的效果.

研究电磁信号在媒质中的传输特性, 主要是确定信号的损耗和色散. 媒质对电磁信号的损耗和色散与信号的频率有

关, 电磁信号在传输过程中, 信号的频率不同受到损耗和色散的作用不同. 随着时间的推移不同频率信号发生不同的变化. 因此从时间和频率二维坐标去观察电磁信号在媒质中的传输, 能更直观地了解信号的变化特性. 光脉冲是电磁波, 在单模光纤中传输同样受到光纤的损耗和色散的影响. 目前光纤损耗已非常低, 色散是影响光脉冲信号传输的主要因数, 而且随着单根光纤上传输多个不同波长信号的光波分复用系统的应用以及传输带宽的进一步的增加, 如何有效地控制色散成为研究光脉冲信号传输特性的主要内容, 也是当前光纤通信系统研究的热点之一. 本文分析了光脉冲信号在单模光纤中传输不同距离的波形, 并用时频分析方法—Wigner-Vill 分布研究了它们的时频特性, 对光脉冲信号色散和能量的变化有了更直观、更清晰的了解.

### 2 Wigner-Vill 分布

#### 2.1 Wigner-Vill 分布及其性质

Wigner-Vill 分布 (WVD: Wigner-Vill Distribution) 由 Wigner 首先提出, Vill 首次将其用于信号分析. 若时间连续信号的解析信号<sup>[6]</sup>为  $z(t)$ , 则其 WVD 为<sup>[6]</sup>

$$WVD_z(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} z(t + \frac{\tau}{2}) z^*(t - \frac{\tau}{2}) e^{-j2\pi f \tau} d\tau \quad (1)$$

或 
$$WVD_z(f, t) = \int_{-\infty}^{\infty} Z(f + \frac{\nu}{2}) Z^*(f - \frac{\nu}{2}) e^{j2\pi \nu t} d\nu \quad (2)$$

式中  $Z(f)$  是  $z(t)$  的傅立叶变换,  $z^*(t)$  和  $Z^*(f)$  分别表示  $z(t)$  和  $Z(f)$  的复共轭. 式(1)、(2)表明, WVD 是一种依赖于时间  $t$  的傅立叶变换, 因此可以表示信号频谱如何随时间变化. WVD 有许多好的性质, 如:

(1) 实数性和对称性.  $WVD_z^*(t, f) = WVD_z(t, f)$ ,  $WVD_z(t, -f) = WVD_z(t, f)$ . (2) 边缘特性. WVD 对频率的积分等于  $t$  时刻的瞬时能量, WVD 对时间的积分等于信号在频率  $f$  处的瞬时能量, 而 WVD 在整个  $(t, f)$  平面上对  $t$  和  $f$  的积分等于信号的总能量. (3) 时移与频移的不变性. 若  $z(t) = y(t - t_0)$ , 则  $WVD_z(t, f) = WVD_y(t - t_0, f)$ ; 若  $z(t) = y(t) e^{j\omega_0 t}$ , 则  $WVD_z(t, f) = WVD_y(t, f - f_0)$ .

这些特性使得 WVD 能代表信号的能量变化, 并能确定能量的变化与频率和时间的关系, 特别是光脉冲是单个高斯型脉冲, WVD 的良好特性能得到充分体现, 且不会出现交叉项<sup>[7]</sup>, 有利于分析处理信号的色散和能量的变化.

### 2.2 Wigner Vill 分布计算的实现

首先要对  $(-\infty, +\infty)$  上的时间信号进行截断, 即加窗处理, 然后将这一段时间信号进行时域、频域的离散化, 使适合进行数值计算. 将式(1)、(2)取有限积分区域离散化, 离散点数为  $2L - 1$  点, 得到伪 Wigner Vill 分布  $\overline{WVD}$  为<sup>[7]</sup>

$$\overline{WVD}_z[m, \theta] = \sum_{n=-(L-1)}^{L-1} z[m+n] z^*[m-n] e^{-j2\theta n} \quad (3)$$

或 
$$\overline{WVD}_z[m, \theta] = \sum_{n=-(L-1)}^{L-1} Z[\theta+n] Z^*[\theta-n] e^{j2mn} \quad (4)$$

式中  $m$  为离散时间变量;  $\theta$  为离散频率变量.

## 3 光脉冲信号的传输

沿光纤轴向  $z$  传播的光脉冲信号(电场或磁场分量)可表示为 
$$V(z, f) = V(0, f) \exp\{-\alpha z\} \exp\{-j\beta_2 z\} \quad (5)$$
 式中  $V(z, f)$  表示轴向  $z$  处的信号,  $V(0, f)$  表示初始信号;  $\alpha$  为衰减系数,  $\beta$  为传输系数,  $\alpha, \beta$  与光纤材料和频率有关. 在光纤通信系统中, 光纤的损耗已降到很低, 特别在 1.55 $\mu$ m 波段, 已接近光纤的本质损耗, 因此可近似认为  $\alpha$  为定值, 与频率无关, 在传输过程中只造成光脉冲幅度的降低. 这样传输特性中主要关心的是光脉冲信号通过光纤传输时光脉冲的色散. 色散造成的光脉冲展宽, 会引起码间干扰, 影响通信质量. 因此分析光纤的色散特性, 确定其与传输距离、频率的关系是非常重要的.

不同频率的光脉冲信号有不同的传输速度, 因此它们各有不同的传输系数.  $\beta_2$  是描述群速度色散的参量, 反映色散效应对光脉冲传输性质的影响<sup>[8]</sup>. 在忽略光纤非线性效应条件下, 光纤中的光场的复振幅  $U(z, \omega)$  可表示为<sup>[8]</sup>

$$U(z, \omega) = U(0, \omega) \exp\{\frac{j}{2}\beta_2 \omega^2 z\} \quad (6)$$

式中  $U(0, \omega)$  是初始光脉冲信号. 若  $\beta_2 = 0$ , 光脉冲在传输时其波形保持不变; 而当  $\beta_2 \neq 0$  时, 将引起脉宽的变化和啁啾的变化, 变化量取决于频率和传输距离.

### 3.1 光脉冲信号传输的 Wigner Vill 分布

#### 3.1.1 无初始啁啾的高斯光脉冲

无初始啁啾的高斯光脉冲的初始信号为

$$u_1(0, T) = \exp\{-T^2/(2T_0^2)\} \quad (7)$$

式中  $T_0$  为初始光脉冲的初始宽度,  $T$  为时间度量. 式(7)的频谱为

$$U_1(0, \omega) = \sqrt{2\pi} T_0 \exp\{-(T_0^2 \omega^2)/2\} \quad (8)$$

代入式(6) 
$$U_1(z, \omega) = \sqrt{2\pi} T_0 \exp\{-\frac{T_0^2 \omega^2}{2}\} \exp\{j\frac{1}{2}\beta_2 \omega^2 z\} \quad (9)$$

把式(9)中的  $\omega$  表示为  $2\pi f$  代入式(2), 即得无初始啁啾的高斯光脉冲信号在单模光纤中传输的 WVD 为

$$WVD_{U_1}(t, f, z) = \int_{-\infty}^{\infty} U_1(z, f + \frac{\nu}{2}) U_1^*(z, f - \frac{\nu}{2}) e^{j2\nu t} d\nu \quad (10)$$

#### 3.1.2 具有线性初始啁啾的高斯光脉冲

有初始啁啾的高斯光脉冲初始信号为

$$u_2(0, T) = \exp\{-(1 + jC) T^2/2T_0^2\} \quad (11)$$

式中  $C$  为初始啁啾参量. 式(11)的频谱为

$$U_2(0, \omega) = \frac{\sqrt{2\pi} T_0}{\sqrt{1 + jC}} \exp\{-\frac{T_0^2 \omega^2}{2(1 + jC)}\} \quad (12)$$

由式(12)代入式(6)得

$$U_2(z, \omega) = \frac{\sqrt{2\pi} T_0}{\sqrt{1 + jC}} \exp\{-\frac{T_0^2 \omega^2}{2(1 + jC)}\} \exp\{j\frac{1}{2}\beta_2 \omega^2 z\} \quad (13)$$

同样把式(13)中的  $\omega$  表示为  $2\pi f$  代入式(2), 即得初始啁啾为  $C$  的高斯光脉冲信号在单模光纤中传输的 WVD 为

$$WVD_{U_2}(t, f, z) = \int_{-\infty}^{\infty} U_2(z, f + \frac{\nu}{2}) U_2^*(z, f - \frac{\nu}{2}) e^{j2\nu t} d\nu \quad (14)$$

### 3.2 光脉冲信号传输的时频特性分析

#### 3.2.1 时域特性

由式(9)和(13), 通过傅立叶变换可得到无和有初始啁啾情况下的时域光脉冲信号为

$$u_1(z, T) = \frac{T_0}{\sqrt{T_0^2 - j\beta_2 z}} \exp\{-\frac{T^2}{2(T_0^2 - j\beta_2 z)}\} \quad (15)$$

$$u_2(z, T) = \frac{T_0}{\sqrt{T_0^2 + C\beta_2 z - j\beta_2 z}} \exp\{-\frac{T^2(1 + jC)}{2(T_0^2 + C\beta_2 z - j\beta_2 z)}\} \quad (16)$$

由式(15)、(16)可绘制出高斯光脉冲信号随传输距离变化的波形变化图(图1). 图中, 初始高斯光脉冲幅度为 1; 光脉冲时间  $T$  以  $t_0$  为单位,  $t_0 = T_0$ ; 传输距离  $z$  以  $z_0$  为单位,  $z_0 = \frac{T_0}{2\beta_2}$ .

从图中可以看出, 无初始啁啾的高斯光脉冲信号随着传输距离的增加, 光脉冲一直展宽(图1(a)). 对于有线性啁啾存在的高斯光脉冲, 则依啁啾的不同而发生了不同的变化, 当  $C\beta_2 > 0$  时, 光脉冲信号的宽度随着传输距离的增加而快速单调增加(图1(b)); 当  $C\beta_2 < 0$  时, 光脉冲信号经历一个初始窄化过程(图1(c)). 由式(16)可以得出最窄光脉冲处的距离为

$$z_{min} = Cz_0/(1 + C^2) \quad (17)$$

光脉冲的窄化是色散啁啾和初始啁啾反号, 使光脉冲的净啁啾减小. 也就是说只要满足  $C\beta_2 < 0$  的条件, 使具有初始啁啾的光脉冲在单模光纤中传输一段距离即可压缩脉宽, 这一特性在色散补偿技术中得到应用.

#### 3.2.2 时频特性

图2是由式(10)按式(4)得到的无初始啁啾的高斯光脉

冲在单模光纤中传输的时频分析图 2(a)、(b)、(c)、(d)、(e)、(f) 分别对应于图 1(a) 中的光脉冲所在位置。每一图中上部是时间窗表示光脉冲信号在时域的变化; 左边为频率窗, 反映信号的频谱, 在频谱中, 幅度、频率坐标均已归一化, 具体值可由给定的  $T_0$  和  $\beta_2$  的值得出; 中部为时频窗, 由上部的时间信号和左边的频谱共同确定, 并以彩色的变化反映不同时间、不同频率成分所对应的信号的能量变化(彩色图标见图 3 右侧)。从时域光脉冲信号看, 只反映光脉冲幅度的变化和脉宽的展宽, 而频域则看不出差别, 但从时频图中不难发现: 信号色散对应的频率成分较高, 而且随着传输距离的增加, 信号高频成分色散更为严重, 能量更分散; 低频与高频成分产生的时延差明显。色散和能量的变化在时频窗中能更直观地反映出来。

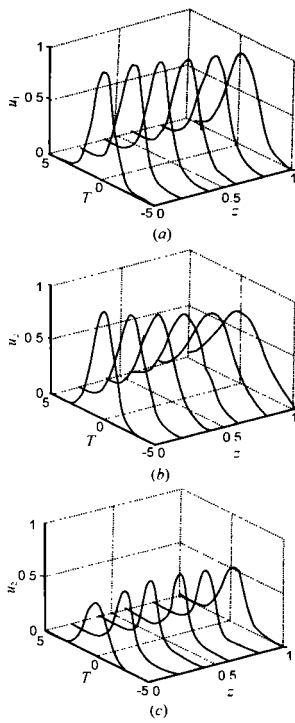


图 1 光脉冲时间信号在单模光纤中的传输

图 3 是由式(14)按式(4)得到的有初始啁啾, 且满足光脉冲窄化条件的光脉冲在单模光纤中传输的时频分析图, 图中(a)、(b)、(c)、(d)、(e)、(f) 分别代表图 1(c) 中光脉冲所在位置, 每一图中代表的内容与图 2 一致。从图中可以看出, 随传输距离增加频谱的变化较小; 时域中光脉冲宽度变窄后又变宽, 而在时频图中则看得更清楚, 光脉冲传输色散很小, 能量基本保持集中, 高频和低频成分产生的时延差很小, 有利于光脉冲的远距离传输。传输距离受初始啁啾  $C$ 、初始光脉冲宽度  $T_0$  和  $\beta_2$  的影响。

4 结束语

时频分析将一维时域或频域信号拓展到二维时频平面, 使能够从时间和频率的联合角度比较分析信号的局部特性, 从而更全面、更直观地了解光脉冲信号在单模光纤中传输任意位置的局部变化。通过分析高斯光脉冲的传输特性分析表明, 时频分析为光脉冲信号在单模光纤传输中传输特性的分析提供了一种有效的分析方法。

参考文献:

- [ 1 ] 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.
- [ 2 ] Trintinalia L C, Ling H. Interpretation of scattering phenomenology in slotted waveguide structures via time frequency processing [ J ]. IEEE Trans. on Antennas and Propagation, 1995, 43( 11 ): 1253- 1261.
- [ 3 ] Victor C Chen, Hao Ling. Joint time frequency analysis for radar signal and image processing [ J ]. IEEE Signal Processing Magazine, 1999, ( 3 ): 81- 93.
- [ 4 ] 李江, 金梁, 傅君眉. 平面传输线上瞬态脉冲信号的联合时- 频描述 [ J ]. 微波学报, 1998, ( 4 ): 283- 287.
- [ 5 ] 董晓婷, 刘亚恂, 汪文秉. 脉冲在等离子体中传播的时频特性 [ J ]. 系统工程与电子技术, 2000, ( 8 ): 31- 33.
- [ 6 ] 张贤达, 保铮. 非平稳信号分析与处理 [ M ]. 北京: 国防工业出版社, 1999, 7.
- [ 7 ] Qian Shi e, Chen D. Joint Time Frequency Analysis [ M ]. New York: Prentice Hall, 1996.
- [ 8 ] G P Agrawl. Nonlinear fiber optics [ J ]. Boston, Mas, Academic Press, Inc. Harcourt Braceanodien, Publishers, 1989, 40.

作者简介:



郭爱煌 男. 1964 年生于江西省. 高级工程师, 西安交通大学电子与信息工程学院博士研究生, 目前主要从事电磁场理论、光通信器件与光通信网络的研究。

傅君眉 女. 1935 年生于上海市. 西安交通大学电子与信息工程学院教授, 博士生导师, 从事电磁场与微波技术、光纤通信技术的教学与研究。

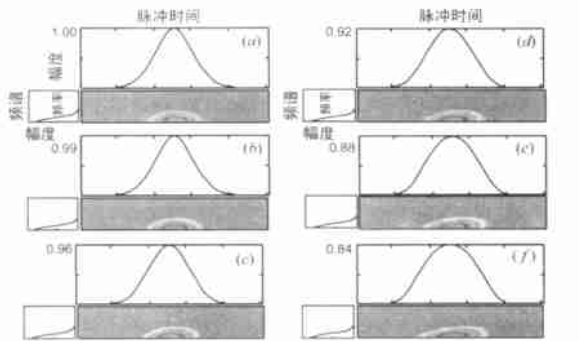


图 2 无初始啁啾的光脉冲传输特性的时频分析

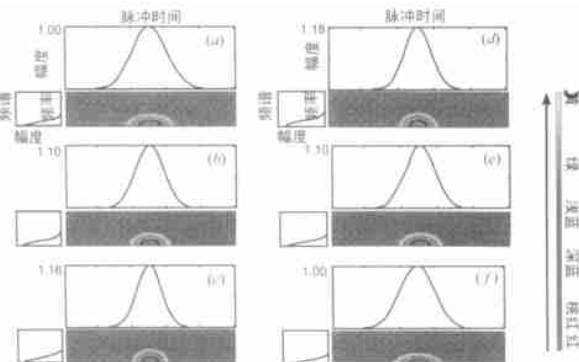


图 3 有初始啁啾的光脉冲传输特性的时频分析