

基于光纤的光学傅里叶变换实现方法及应用

孔梦龙, 谭中伟*, 张琳

北京交通大学光波技术研究所全光网络与现代通信网教育部重点实验室, 北京 100044

摘要 在检测频率复杂的信号时, 光学傅里叶变换的高带宽、快速性优势凸显, 其在光谱和高速射频信号的实时检测中都有重要应用。基于色散的光学傅里叶变换方法包括色散展宽和时间透镜方法。基于光纤色散方法, 对比分析了基于色散展宽和基于时间透镜的光学傅里叶变换的实现原理。对两类方案中 5 种不同系统的输出结果、色散量、光谱分辨率、时间带宽积等影响因素进行分析, 分别阐述了其应用及改进方案。

关键词 傅里叶光学; 时频转换; 光纤色散; 时间透镜

中图分类号 O433.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.110701

Application and Implementation of Optical Fourier Transform Based on Optical Fiber

Kong Menglong, Tan Zhongwei*, Zhang Lin

Key Laboratory of All Optical Network and Advanced Telecommunication Network, Ministry of Education, Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

Abstract The advantages, high bandwidth and high speed, of optical Fourier transform have been proved to be highlighted since the frequency of the objective signal becomes increasingly complicated, further, it has significant applications in the fields of optical spectra and real-time detection of high-speed radio frequency signals. The optical Fourier transform based on fiber dispersion comprises two particular methods: dispersive pulse broadening and time lens. Based on the optical fiber dispersion method, the realization principles of optical Fourier transform based on dispersion broadening and time lens are compared and analyzed. In addition, it summarizes five representative approaches divided into two categories, analyzes the empirical performance including output, dispersion, spectral resolution, time-bandwidth product, and expounds the applicability and improvement of these approaches.

Key words Fourier optics; time-frequency conversion; fiber dispersion; time lens

OCIS codes 070.4790; 070.2465

1 引言

实时傅里叶变换在雷达、声纳和通信系统的无线电频率中具有广泛应用。传统光谱检测主要依靠光学光谱仪, 由于实际工程中的探测器速率低, 主要依靠传感器和探测器的光谱仪精度较低, 且不能实时进行光谱测量。光学傅里叶变换(OFT)以带宽高、速度快等优点逐渐应用于实时频谱检测系统, 其既可以利用光子技术的带宽优势提高频谱测试的带宽和速度, 又可以利用微波技术大幅提高光谱测试

的精度, 现已成为信号快速检测的一个热点。

在光学领域, 夫琅禾费衍射系统可以在其后面的平面上呈现原图像的频谱信息, 该现象说明夫琅禾费衍射可以实现二维图像的傅里叶变换, 为较早的光学傅里叶变换依据。在时空对应原理中, 窄带光脉冲在色散介质中传输的色散方程与空间傍轴光束的传输方程相似^[1], 所以基于色散展宽的实时光谱操作类似于夫琅禾费衍射对空间信号进行傅里叶变换, 时域光信号通过具有二阶色散的介质传输可以实现 OFT。实践中发现, 光谱的宽度限制了色散

收稿日期: 2018-10-25; 修回日期: 2018-12-17; 录用日期: 2018-12-25

基金项目: 国家自然科学基金(61875008)

* E-mail: zhwtan@bjtu.edu.cn

介质的长度、系统的分辨率等^[2]。上述问题制约了光学傅里叶变换的研究。Kolner 等^[3-4]在 1989 年和 1994 年,类比空间透镜实现傅里叶变换原理,首先定义了“时间透镜”,并详细推导了利用电光相位调制器实现时间透镜的数学原理。基于电光调制器的时间透镜因其具有实现简单、灵活性强、稳定性高等优点被广泛应用,但也面临时间孔径小、分辨率低、调制深度小等问题^[3-7],从而限制整个系统的性能。

本文对比介绍了基于色散介质展宽和基于时间透镜实现光学傅里叶变换的实现机理,研究了系统

的影响因素,对这两大类 5 种系统的应用进行了详细的阐述。

2 OFT 实现方案分类与对比

OFT 的实现方法可以分为基于色散展宽的傅里叶变换(DFT)和基于时间透镜的傅里叶变换,其中,DFT 方案仅能实现频域-时域的转换;时间透镜方案根据系统的结构不同,可以同时实现频域-时域和时域-频域的变换。对于调制信号,时间拉伸和压缩的方法,其实际为频谱被色散展宽的过程。OFT 实现方案的具体分类如图 1 所示。

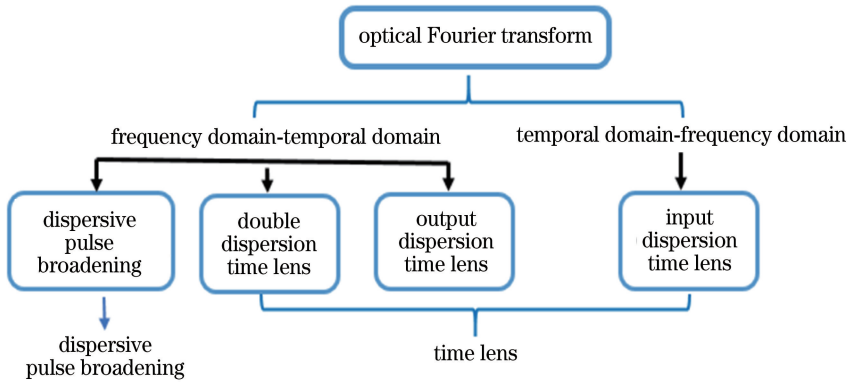


图 1 光学傅里叶变换方案类型

Fig. 1 Classification of optical Fourier transform schemes

对比 DFT 和基于时间透镜的傅里叶变换的不同,结果如表 1 所示,其中 l 为色散光纤的长度, D 为光纤色散量系数(单位: $\text{ps} \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$), R 为数字处理器的采样率, Γ 为调制器调制深度, ω_m 为调制器上驱动信号的角频率。

表 1 基于色散展宽和时间透镜的傅里叶变换对比

Table 1 Comparison of Fourier transform based on dispersive broadening and time lens

Plan of implementation	Dispersion Fourier transform	Time lens
Principle	Dispersioninduced time domain broadening	Time-frequency conversion by time lens
Dispersion requirement	Large group velocity dispersion, Longer fiber	Suitable group velocity dispersion, broadening pulse smaller than time aperture
Limiting factor	Input pulse width, period, high-order dispersion	Input pulse width, period, time aperture
Resolution	$(R D l)^{-1}$	$2.77 / (\Gamma\omega_m)$
Light source	Wideband coherent	Narrow bandwidth

3 DFT

3.1 DFT 原理

时空对应原理中,色散展宽实时光谱操作类似于夫琅禾费衍射对空间信号进行傅里叶变换。根据相似性可得,DFT 的条件为^[8-9]

$$l \gg \tau_0^2 / (2\pi |\beta_2|), \quad (1)$$

式中: τ_0 为输入脉冲的宽度; β_2 为光纤的二阶色散系数。

展宽后脉冲的宽度表达式为

$$\Delta\tau = |D| l \Delta\lambda, \quad (2)$$

式中: $\Delta\lambda$ 为输入信号的波长范围。为防止展宽后脉冲重叠, $\Delta\tau < T$, T 为光源脉冲的周期。

实现傅里叶变换的最简单方法就是将信号通过具有二阶色散的介质传输^[10-11]。为了实现 DFT,要求选择 D 尽量大的色散介质,保证脉冲信号能充分

色散展宽。光信号通过色散介质后经过探测器和高速模数转换器(ADC)、数字处理设备,完成对输出信号的快速采样以及光谱的实时分析^[12]。包文强等^[13]利用振荡器实现了高速率采样技术,采样率高

达 40 GSa/s,但过大的群速度色散将会使得输出信号受到高阶色散的影响,进而导致时域信号畸形。色散介质傅里叶变换过程如图 2 所示。

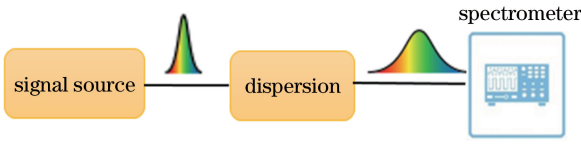


图 2 基于色散展宽的傅里叶变换过程
Fig. 2 Fourier transform process based on dispersive pulse broadening

3.2 DFT 系统的应用

使用单模光纤实现光学傅里叶变换是最简单和最常用的方法,其具有低损耗和高机械稳定性特点。然而,低损耗单模光纤不适用于所有波段,且在某些应用中不希望有长光纤引起的延迟^[14]。色散介质还可以使用色散补偿光纤和啁啾布拉格光栅(CFBG)^[15-16],或者基于模式色散的色散系统^[17]。CFBG 是光学傅里叶变换技术中很有潜力的一种器件,其具备延迟短,色散大,损耗低以及体积小等特点,但主要问题在于群时延纹波会影响系统的精确度。

色散展宽系统的应用主要于构建实时光谱仪、成像、激光扫描和数模转换等领域,其中,最直接的应用是构建实时光谱仪^[9,18]。色散展宽系统的另一个成功的应用是时间展宽技术^[19]。通过使用电光调制器将射频信号调制到脉冲光谱上,信号经过较长的光纤传输后,输出的时域波形已经被展宽,这意味着输出信号的速率减小,可使用相对较低速的模数转换器(ADC)和数据处理设备完成对高速信号的快速采样,该方法被广泛称为光子时间拉伸技术。文献^[20-21]已证明光子时间拉伸技术可以使用低带宽数字化仪对高带宽微波信号进行采样。色散傅里叶变换在成像方面^[22-23]和光学相干层扫描方面^[24-25]都得到了应用。

3.3 色散展宽光学傅里叶变换系统的性能

DFT 系统中的关键参数有:光谱分辨率、扫描率、采样点数、探测器带宽以及数字处理器的采样率等^[12]。

光谱分辨率是光谱检测的最重要的参数之一。DFT 系统的采样点数为 $N = R \Delta \tau$,根据(2)式可知,波长和时间的映射为 $\Delta \lambda = \Delta \tau / (|D|l)$,其主要受到两个因素的制约,分别是采样率受限的光谱分辨率 $\partial \lambda = (R|D|l)^{-1}$ 和光纤色散受限的光谱分辨率 $\partial \lambda = \lambda_0 \sqrt{2(c|D|l) - 1}$, λ_0 为激光器的中心波长, c 为

真空中的光速。当系统在脉冲展宽不超过脉冲周期时,色散量越大,系统的分辨率越高^[12]。在实际情况下,系统的分辨率受两者中较大的影响较大。以采样率 10 GHz 为例,色散量和光谱分辨率关系如图 3 所示。

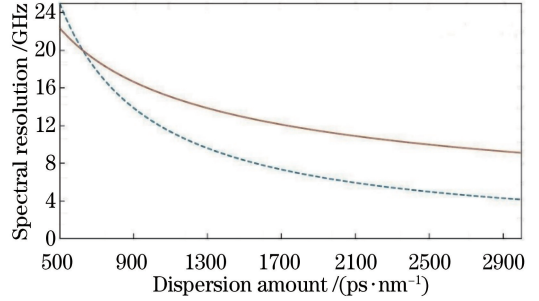


图 3 色散量和分辨率关系图

Fig. 3 Relationship between dispersion amount and spectral resolution frequency

4 基于时间透镜的傅里叶变换

根据空间光场与时域波形传输的对应性,基于衍射的空间域概念,都可以对应应用于基于时域色散的时域信号处理中。类比于空间透镜,时间透镜在时域上可以实现光的二次调制,主要功能是实现成像(展宽和压缩)^[26]和傅里叶变换等。根据结构中色散量的情况,可以将系统分为双色散介质系统、输出色散系统和输入色散系统^[27-28]。其中前两者对应完成频域-时域的变换,后者用来完成时域-频域的变换。

4.1 双色散时间透镜系统

双色散时间透镜实现傅里叶变换的方案如图 4 所示。其中输入段色散 D_1 、输出段色散 D_2 和时间透镜的焦距公式满足

$$1/D_1 + 1/D_2 = -\omega_0/f_\tau, \quad (3)$$

$$1/D_1 = 1/D_2 = -\omega_0/f_\tau, \quad (4)$$

此时系统输出的结果分别为原物体信号的像和信号的频谱信息^[3-4]。式中: $D_1 = [l_1(d^2\beta_{2,in}/d\omega^2)]^{-1}$, $D_2 = [l_2(d^2\beta_{2,out}/d\omega^2)]^{-1}$, ω 为角频率, l_1, l_2 为输入和输出段光纤的长度, $\beta_{2,in}, \beta_{2,out}$ 为输入和输出段光纤的二阶色散系数; ω_0 为光载频中心频率; $f_\tau = \omega_0/(\Gamma\omega_m^2)$ 为时间透镜的焦距, $\Gamma = v_0\pi/v_\pi$ 为调制器调制深度, v_0, v_π 为调制器的驱动电压和半波电压。

两段色散介质长度相同的光纤具有相同的 β_2 。以 β_2 为二阶色散系数的光纤的传递函数为 $h_D(t) = Q \exp[jt^2/(2\beta_2 l)]$, Q 为常数, t 为时间;时间透镜的传递函数为 $h_M(t) = \exp[j(2\beta_2 l)^{-1}t^2]$ 。设输入光

信号脉冲为 $A_{in}(t)$, 傅里叶变换为 $\mathcal{F}_{in}(\omega)$ 。则光脉冲经过基于时间透镜为基础的傅里叶变换系统时, 有

$$A_{out}(t) = \{[A_{in}(t) * h_D(t)]h_M(t)\} * h_D(t), \quad (5)$$

式中: $*$ 表示卷积, 输出结果为 $A_{out}(t) = C\mathcal{F}\left(-\frac{t}{\beta_2 l}\right)$, C 为常数, \mathcal{F} 表示傅里叶变换。可见输出时域脉冲和输入脉冲的频谱相似, 只是在时间上乘了一定的系数。

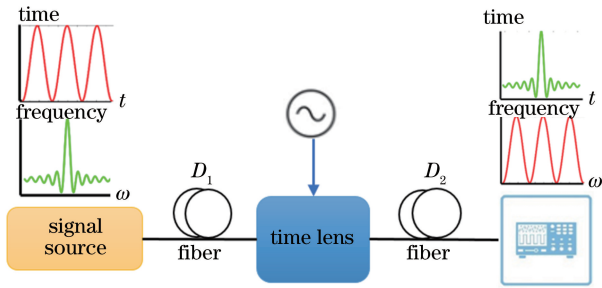


图 4 基于时间透镜的傅里叶变换结构图
Fig. 4 Structural diagram of Fourier transform based on time lens

定义相位调制器的驱动信号偏离二次信号 2% 作为有效调制时间^[4], 即时间孔径大小为 $\tau_a \approx 1/\omega_m$ 或 $\tau_a = 15.6\% T_m$, ω_m 和 T_m 分别为调制器驱动信号的角频率和周期, 时间孔径和信号的频率成反比。

从(4)式可以看出, 控制输入输出色散量即可实现傅里叶变换。在实际中, 受调制器时间孔径的限制, 输入到调制器的脉冲宽度小于时间孔径时, 调制器才能完整地作用于信号。在调制器之前, 输入信号要经过色散时域展宽, 所以在满足(4)式时, 时间透镜变换系统的输出结果与前端光源的脉冲宽度、信号脉冲周期、输入段色散量以及时间孔径等均有关。输入激光器光源的脉冲宽度、脉冲的重复率和输入段色散量要尽量小。

4.2 输出色散透镜系统

当系统输入色散为 0, 而输出色散不为 0 时, 系统也可以完成 OFT^[29]。数学原理和双色散变换系统类似, 不同之处在于: 此系统中输出时域的表达式为 $A_{out}(t) = [A_{in}(t)h_M(t)] * h_D(t)$, 结果为 $K \cdot \exp[jt^2/(2\beta_2 l)]\mathcal{F}(\omega)$, K 为常数。结果中因含有 $\exp[j(1/(2f_\tau))t^2]$, 输出的时域波形分布不同于输入信号的频谱相位分布, 两者之间的差别为一个相位弯曲^[30], 使得输出结果关系不准确。输入色散系统的结构如图 5 所示。

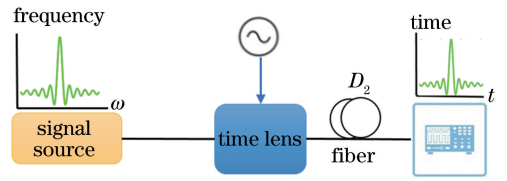


图 5 输出色散时间透镜系统结构图
Fig. 5 Structural diagram of output dispersive time lens system

采用和双色散傅里叶变换相似的系统, 因此具有相同的时间孔径和时间分辨率 $\tau_0 = 2.77/(\Gamma\omega_m)$ 。基于时间透镜的时域光信号处理系统的表现不仅取决于时间孔径和时间分辨率, 还取决于时间带宽积, 其表达式为

$$T_{BP} = \tau_a(1/\tau_0) = \Gamma/2.77. \quad (6)$$

在实际情况中, 时间孔径和时间分辨率相互矛盾, 但是时间孔径和频率带宽 ($1/\tau_0$, 时间分辨率的倒数) 的乘积为一定值, 即时间带宽积。时间带宽积越大, 系统性能越好。时间透镜受驱动信号和结构的影响, 基于电光相位调制器的 $T_{BP} < 10$, 基于交叉相位调制 (XPM) 的时间透镜可实现 $T_{BP} \approx 20$ ^[6], 基于四波混频的时间透镜可以实现 $T_{BP} > 450$ ^[31]。所以增大时间孔径和减小调制器的半波电压仍然是基于电光相位调制器的时间透镜未来的研究方向。

4.3 输入色散透镜系统

当输出色散为 0 时, DFT 系统可以实现从时域到频域的傅里叶变换, 即输出信号的频域谱和输入信号的时域谱相似^[32]。输入色散时域到频域系统的结构图和信号变换过程如图 6 所示。

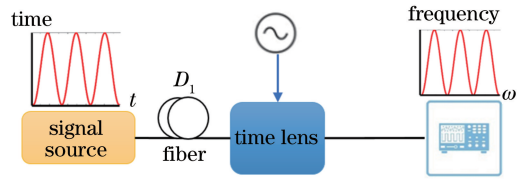


图 6 输入色散时间透镜系统结构图
Fig. 6 Structural diagram of input dispersive time lens system

根据 4.1 节中的传递函数, ω_0 为光载频中心频率, 经过色散介质和电光相位调制器后的结果为

$$\mathcal{F}_{out}(\omega) = A_{in}(t) \exp[-j\omega_0 t^2 / (2f_\tau)] \Big|_{t=\omega f_\tau / \omega_0}, \quad (7)$$

输出信号的频谱与输入信号的时域对应相似, 但因存在二阶相位因子的乘积, 同样存在相位弯曲现象, 结果不准确。

上述时间透镜都是以电光相位调制器为基础,

所以变换系统的时间孔径、时间分辨率、时间带宽积都相似。对于同样的输入的信号,输入到时间透镜的脉冲信号的时域宽度能否被时间孔径完全覆盖、能否得到理想的转换结果取决于光纤长度和色散

量。另外,从数学表达式也可以看出,利用双色散将脉冲从频域变换到时域时,相比于单色散,系统输出结果中没有二阶相位因子,结果更准确。上述方案的比较结果如表 2 所示。

表 2 基于电光相位调制器的时间透镜傅里叶变换系统比较

Table 2 Summary analysis of time lens Fourier transform system based on electro-optical phase modulator

Type of system	Transform domain	Condition	Time aperture	System output	System performance analysis
Dual dispersive lens system	Frequency-time	$l_1\beta_2 = l_2\beta_2$ $l_1\beta_2 = -f_\tau/\omega_0$	$\tau_a \approx 1/\omega_m$	$C\mathcal{F}\left(-\frac{t}{\beta_2 l}\right)$	System output being linear amplification of input time domain
Output dispersive lens system	Frequency-time	$l_2\beta_2 = -tf_\tau/\omega_0$	$\tau_a \approx 1/\omega_m$	$K \exp\left(-j\frac{t^2}{2\beta_2 l}\right)\mathcal{F}(\omega)$	Output being product of input frequency domain and phase factor
Input dispersive lens system	Time-frequency	$l_1\beta_2 = -f_\tau/\omega_0$	$\tau_a \approx 1/\omega_m$	$A_m(t)\exp\left(-j\frac{\omega_0 t^2}{2f_\tau}\right)$	Frequency domain of output being product of input time domain and phase factor

4.4 其他时间透镜傅里叶变换系统

基于调制器的时间透镜实现灵活,系统简单,但是系统限制因素很多,为了解决输出时间透镜系统中输出结果的相位弯曲,可以对系统进行改进,在透镜系统之后添加透镜,引入相反的相位因子实现理想变换^[28],如图 7 所示。

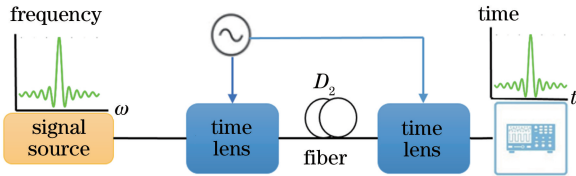


图 7 双时间透镜(频域-时域)系统

Fig. 7 Dual time lens (frequency domain-time domain) system

从输出的结果 $A_{out}(t) = \mathcal{F}[-t/(\beta_2 l)]$ 看,利用两个相位调制器也可以实现傅里叶变换,只是时间上有一个系数。另外,文献[31]介绍了基于四波混频实现的时间透镜,四波混频的时间透镜引入抽运光产生的二次相位偏移与抽运光强度无关,只与抽运光色散的啁啾大小有关,使得整个系统的调制深度达到 100π 。XPM 实现的时间透镜可以得到严格的二次相位调制,所以不存在孔径限制^[33]。

在基于调制器的时间透镜的应用方面,最典型的就是基于 $4-f$ (4 -焦距) 和 $2-f$ (2 -焦距) 系统的超快光信息处理^[34]。 $4-f$ 系统包含两个 $2-f$ 系统, $2-f$ 系统作为典型的傅里叶变换的处理核心,调整调制器位置后,其可以实现逆傅里叶变换。该信号处理技术已成功用于图像检测^[35] 和脉冲整形^[36]。

5 时间透镜傅里叶变换系统的性能

上述频时转换方案,尤其是双色散和双时间透镜的结果中不含二阶相位因子。时间透镜中受色散和透镜限制,光谱分辨率为 $\tau_0 = 2.77/(\Gamma\omega_m)$ 。与时间展宽系统相比,基于时间透镜傅里叶变换系统需要的光纤更短,但增加了时间孔径的约束,其优点在于对光源要求低,且调制比较灵活,适用于通信系统;而时间展宽系统输入限制较少,且光谱分辨率高,更适用于测试系统。

6 结 论

对比了基于色散展宽和基于时间透镜的光学傅里叶变换的实现原理。在基于色散展宽的实现方案中,以光纤为介质,主要介绍了实现条件、色散量大小、初始脉冲宽等因素的影响,在接收系统中主要分析了展宽后信号的光谱分辨率,分别介绍了基于时间透镜的双色散系统、输出色散系统和输入色散系统,分析了系统的时间孔径、时间分辨率、时间带宽积以及光谱分辨率等参数对系统的影响;同时,介绍了上述两种方案的应用和改进。

目前,傅里叶变换已广泛应用于实时频谱分析,但基于电光调制器的时间透镜限制因素太多,在实际中应用多采用非线性方案。傅里叶变换技术还可以应用于时间压缩和频谱展宽、复用技术等,或者用于开发光电集成化处理电路系统,提高系统的分辨率。因此,不断地优化系统,将会使该技术应用领域更广泛。

参 考 文 献

- [1] Papoulis A. Pulse compression, fiber communications, and diffraction: a unified approach [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1994, 11(1): 3-13.
- [2] Berger N K, Levit B, Atkins S, *et al.* Time-lens-based spectral analysis of optical pulses by electrooptic phase modulation [J]. *Electronics Letters*, 2000, 36(19): 1644-1646.
- [3] Kolner B H, Nazarathy M. Temporal imaging with a time lens [J]. *Optics Letters*, 1989, 14(12): 630-632.
- [4] Kolner B H. Space-time duality and the theory of temporal imaging [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1994, 30(8): 1951-1963.
- [5] Bennett C V, Kolner B H. Principles of parametric temporal imaging: Part I: System configurations [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2000, 36(4): 430-437.
- [6] Ng T T, Parmigiani F, Ibsen M, *et al.* Compensation of linear distortions by using XPM with parabolic pulses as a time lens [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2008, 20(13): 1097-1099.
- [7] Salem R, Foster M A, Turner A C, *et al.* Optical time lens based on four-wave mixing on a silicon chip [J]. *Optics Letters*, 2008, 33(10): 1047-1049.
- [8] Goda K, Solli D R, Tsia K K, *et al.* Theory of amplified dispersive Fourier transformation [J]. *Physical Review A*, 2009, 80(4): 043821.
- [9] Solli D R, Chou J, Jalali B. Amplified wavelength-time transformation for real-time spectroscopy [J]. *Nature Photonics*, 2008, 2(1): 48-51.
- [10] Fetterman H R, Tannenwald P E, Parker C D, *et al.* Real-time spectral analysis of far-infrared laser pulses using an SAW dispersive delay line [J]. *Applied Physics Letters*, 1979, 34(2): 123-125.
- [11] Salem R, Foster M A, Gaeta A L. Application of space-time duality to ultrahigh-speed optical signal processing [J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2013, 5(3): 274-317.
- [12] Goda K, Jalali B. Dispersive Fourier transformation for fast continuous single-shot measurements [J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(2): 102-112.
- [13] Bao W Q, Yu J L, Wang W R. High-rate optical sampling technology based on photoelectric oscillator [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(6): 060701.
- 包文强, 于晋龙, 王文睿. 基于光电振荡器的高速率光采样技术 [J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(6): 060701.
- [14] Tong Y C, Chan L Y, Tsang H K. Fibre dispersion or pulse spectrum measurement using a sampling oscilloscope [J]. *Electronics Letters*, 1997, 33(11): 983-985.
- [15] Muriel M A, Azaña J, Carballar A. Real-time Fourier transformer based on fiber gratings [J]. *Optics Letters*, 1999, 24(1): 1-3.
- [16] Hill K O, Meltz G. Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, 15(8): 1263-1276.
- [17] Diebold E D, Hon N K, Tan Z W, *et al.* Giant tunable optical dispersion using chromo-modal excitation of a multimode waveguide [J]. *Optics Express*, 2011, 19(24): 23809.
- [18] Hult J, Watt R S, Kaminski C F. High bandwidth absorption spectroscopy with a dispersed supercontinuum source [J]. *Optics Express*, 2007, 15(18): 11385.
- [19] Nuruzzaman A, Boyraz O, Jalali B. Time-stretched short-time Fourier transform [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2006, 55(2): 598-602.
- [20] Han Y, Jalali B. Photonic time-stretched analog-to-digital converter: fundamental concepts and practical considerations [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2003, 21(12): 3085-3103.
- [21] Dorrer C. Single-shot measurement of the electric field of optical waveforms by use of time magnification and heterodyning [J]. *Optics Letters*, 2006, 31(4): 540-542.
- [22] Goda K, Tsia K K, Jalali B. Serial time-encoded amplified imaging for real-time observation of fast dynamic phenomena [J]. *Nature*, 2009, 458(7242): 1145-1149.
- [23] Shen Y, Chen Z Y, Qiu J R, *et al.* Research progress on parallel spectral domain optical coherence tomography technology [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(2): 0207004.
- 沈毅, 陈志彦, 邱建榕, 等. 并行谱域光学相干层析成像技术的研究进展 [J]. *中国激光*, 2018, 45(2): 0207004.
- [24] Park Y, Ahn T J, Kieffer J C, *et al.* Optical frequency domain reflectometry based on real-time Fourier transformation [J]. *Optics Express*, 2007, 15

- (8): 4597-4616.
- [25] Goda K, Fard A, Malik O, *et al.* High-throughput optical coherence tomography at 800 nm[J]. *Optics Express*, 2012, 20(18): 19612-19617.
- [26] van Howe J, Xu C. Ultrafast optical signal processing based upon space-time dualities [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, 24 (7): 2649-2662.
- [27] Li B. Novel time lenses and their applications in ultrafast optical signal processing [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015.
李博. 新型时间透镜及其在超快光信号处理中的应用研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
- [28] Ye F. The research of an optical fiber spectrum intensity modulation direct detection transmission system[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011.
叶斐. 一种高速光纤频域强度调制直接探测传输系统的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
- [29] Nakazawa M, Hirooka T, Futami F, *et al.* Ideal distortion-free transmission using optical Fourier transformation and Fourier transform-limited optical pulses [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2004, 16(4): 1059-1061.
- [30] Joseph W. Coodman. Introduction to Fourier optics [M]. Qin K C, Liu P S, Chen J B, *et al.*, Transl. 3rd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011: 73-77.
- 约瑟夫·古德曼. 傅里叶光学导论[M]. 秦克诚, 刘培森, 陈家壁, 等, 译. 3版. 北京: 电子工业出版社, 2011: 73-77.
- [31] Foster M A, Salem R, Geraghty D F, *et al.* Silicon-chip-based ultrafast optical oscilloscope[J]. *Nature*, 2008, 456(7218): 81-84.
- [32] Kauffman M T, Banyai W C, Godil A A, *et al.* Time-to-frequency converter for measuring picosecond optical pulses [J]. *Applied Physics Letters*, 1994, 64(3): 270-272.
- [33] Li B, Tan Z W, Zhang X X. Experiment and simulation of time lens using electro-optic phase modulation and cross phase modulation [J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(8): 084204.
李博, 谭中伟, 张晓兴. 利用电光相位调制和交叉相位调制制作时间透镜的实验及仿真分析[J]. *物理学报*, 2011, 60(8): 084204.
- [34] Mendlovic D, Melamed O, Ozaktas H M. Compact optical temporal processors [J]. *Applied Optics*, 1995, 34(20): 4113-4118.
- [35] Lugt A V. Signal detection by complex spatial filtering [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1964, 10(2): 139-145.
- [36] Weiner A M, Heritage J P, Kirschner E M. High-resolution femtosecond pulse shaping [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 1988, 5(8): 1563-1572.