

引用格式: YANG Bo, ZHAO Lei, YANG Shuna, et al. Real-time Spectrum Analysis of Wideband RF Signals Based on Fractional Temporal Talbot Effect[J]. Acta Photonica Sinica, 2024, 53(4):0406006

杨波, 赵雷, 杨淑娜, 等. 基于分数阶时域 Talbot 效应的宽带射频信号实时频谱分析[J]. 光子学报, 2024, 53(4):0406006

# 基于分数阶时域 Talbot 效应的宽带射频信号 实时频谱分析

杨波<sup>1,2</sup>, 赵雷<sup>1</sup>, 杨淑娜<sup>2</sup>, 池灏<sup>2</sup>

(1 中国矿业大学 信息与控制工程学院, 徐州 221116)

(2 杭州电子科技大学 通信工程学院, 杭州 310018)

**摘要:**提出一种基于分数阶时域 Talbot 效应的宽带射频信号实时频谱分析方案。该方案基于采样和色散结构, 实现射频信号频率到光脉冲时间间隔的映射。通过预先经过一个满足分数阶时域 Talbot 距离的色散元件, 光脉冲在采样之前的重复频率发生倍增。利用分数阶时域 Talbot 效应, 可以显著提升系统的频率测量带宽。实验结果表明, 利用 9 阶分数阶时域 Talbot 效应, 实现 29.7 GHz 带宽内单音和双音射频信号的实时频谱分析。数值仿真结果进一步验证了该方案能够有效分析频率快速变化的宽带射频信号。该方案结构简单、带宽大、可实时处理, 有望应用于电子对抗、宽带雷达、认知无线电等场景。

**关键词:**频谱分析; 光子辅助射频频谱分析; 实时傅里叶变换; Talbot 效应; 分数阶时域 Talbot 效应

中图分类号: TN29

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20245304.0406006

## 0 引言

射频(Radio Frequency, RF)信号的实时频谱分析是一项关键基础技术, 广泛应用于电子对抗、雷达系统和认知无线电等领域<sup>[1-4]</sup>。主流的频谱分析方法是先用模数转换器(Analog-Digital Converter, ADC)将接收到的模拟信号转换为数字信号, 再用数字信号处理器(Digital Signal Processor, DSP)进行快速傅里叶变换, 以获得频谱信息。然而, 这种基于数字处理的实时频谱分析方法受到当前 ADC 采样速率和 DSP 处理速度的极大限制, 一方面是瞬时带宽有限, 通常在 GHz 量级以下, 另一方面是实时性不足, 现阶段还难以 100% 无间隙分析持续时长在微秒及更短量级的宽带瞬变信号<sup>[5]</sup>。为了提高射频频谱分析的带宽和实时性, 人们提出多种光子辅助射频频谱分析方法, 包括光子辅助瞬时频率测量<sup>[6-7]</sup>、光扫频接收机<sup>[8-9]</sup>、光子辅助信道化<sup>[10-11]</sup>和光学实时傅里叶变换<sup>[5, 12-15]</sup>。光子辅助瞬时测频方案, 一般通过两条互补的光链路将微波频率转换为光功率或微波功率, 具有大带宽和低延迟的特点, 但它只适合测量单频信号。光扫频接收机通过周期性地改变本振光信号的频率, 来扫描获取待测信号的频率, 这种方法带宽大, 频谱分辨率高, 但不能用于实时频率测量, 难以捕捉到瞬态信号。光子辅助信道化方案通过将宽带信号划分为多个小带宽子通道, 可以降低对 ADC 采样率的要求。采用双光频梳和相干探测的光子辅助信道化方案具有大带宽、高频谱分辨率的特点<sup>[11]</sup>。尽管如此, 它仍然需要多通道数字傅里叶变换, 巨大的数据量会引入延迟。光学实时傅里叶变换将未知射频信号的频谱映射到时域, 通过分析输出信号的时域包络来实现实时串行检测。实现光学实时傅里叶变换的一种方法是使用频移环路<sup>[12]</sup>。然而, 系统的瞬时带宽受限于环路的自由光谱范围, 仅为数十 MHz。另一种方法是基于两个色散元件的时域卷积方法<sup>[13-15]</sup>。在该系统中, 具有超宽带频谱的光脉冲由第

基金项目: 国家自然科学基金(Nos. 62101168, 61975048, 61901148)

第一作者: 杨波, yangbozju@hdu.edu.cn

通讯作者: 赵雷, leizhao@cumt.edu.cn

收稿日期: 2023-08-24; 录用日期: 2023-10-07

<http://www.photon.ac.cn>

一色散元件进行时间拉伸,由被测信号调制后,被第二色散元件压缩。当两个色散元件具有相同的色散值但符号相反时,输出处的波形等于光脉冲与待测信号频谱的卷积。由于光脉冲的带宽远远超出了最先进的光电探测器和示波器的带宽,限制了系统频率分辨率,后续又引入了时间透镜放大技术<sup>[14]</sup>或异步光学采样<sup>[15]</sup>来降低脉冲采集系统的带宽要求,实验中实现了百 MHz 量级的频谱分辨率。2020年,加拿大研究团队提出了一种基于简单采样和色散延迟结构的实时无间隙动态波形频谱分析方案<sup>[5]</sup>。在该方案中,当光脉冲采样周期和色散值满足时域 Talbot 效应的产生条件时,将直接在时域上周期地显示待测信号的傅里叶变换波形。根据奈奎斯特采样定理,为了避免脉冲间的混叠,系统的频率测量带宽将固定为光脉冲重复频率的一半。该方案能够实现 GHz 以上带宽, ns 量级持续时间瞬变信号的实时频谱测量,但是系统的频率测量带宽和频谱分辨率受限于输入光脉冲序列的重复率和脉冲宽度。针对频谱分辨率受限的问题,本课题组曾提出引入逆时域 Talbot 效应<sup>[16]</sup>,预先对采样光脉冲实施二次相位调制,经过符合  $N$  阶逆时域 Talbot 效应条件的色散后,输出光信号的时域包络仍为输入射频频谱的尺度变换,但尺度变换系数增大  $N$  倍,使得频谱分辨率提升  $N$  倍。

本文提出了一种基于分数阶时域 Talbot 效应的射频信号实时频谱分析方案。利用两段色散介质和采样结构,通过观测系统输出的成对脉冲的时间间距,依据时频映射关系实时得到待测信号的频率信息。不同于原有基于整数阶 Talbot 效应的方法,该方案通过分数阶 Talbot 效应,在不改变整体色散量的情况下,提高采样光脉冲的重复频率,从而提高系统的频率测量带宽。

## 1 系统原理

图 1 为基于分数阶时域 Talbot 效应的宽带射频信号实时频谱分析方案的原理。图 1(a)描述了分数阶和整数阶 Talbot 效应的原理,光脉冲序列经过一段色散量为  $\phi_1$  的色散介质,之后通过第二段色散量为  $\phi_2$  的色散介质。其中,  $\phi_1$  和  $\phi_2$  均满足  $m$  阶分数阶时域 Talbot 效应条件,并且  $\phi_1 + \phi_2$  满足整数阶时域 Talbot 效应条件,  $m$  为正整数。在第一段色散介质后,光脉冲序列的重复频率会变为原先的  $m$  倍<sup>[17]</sup>;在第二段色散介质后,光脉冲序列的重复频率变为初始重复频率。如图 1(b)所示,若用待测射频信号调制经过第一段色散介质后的光脉冲,在第二段色散介质之后观测到的脉冲波形即为待测射频信号的傅里叶变换版本,通过观测系统输出的成对脉冲的时间间距即可实时获取待测射频信号的频率。由于光脉冲序列经过满足  $m$  阶分数阶时域 Talbot 效应条件的色散介质时,脉冲序列的重复频率变为原先的  $m$  倍,系统的测频带宽也提高为原先的  $m$  倍。

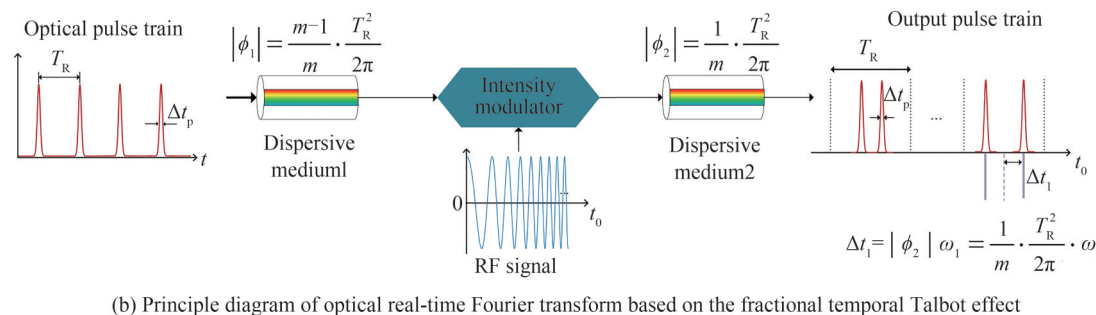
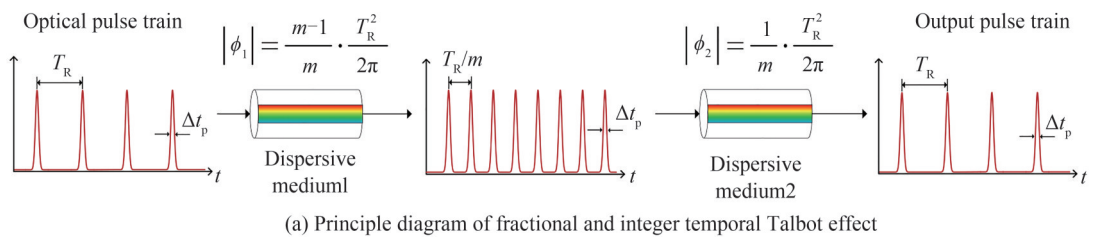


图 1 基于分数阶时域 Talbot 效应的宽带射频信号实时频谱分析方案原理

Fig. 1 Principle diagram of wideband RF signal real-time spectra analysis based on the fractional temporal Talbot effect

周期为  $T_R$  的光脉冲序列,并且序列中脉冲等幅度、等相位,其电场表达式可表示为

$$g_T(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} g(t - kT_R) \quad (1)$$

式中,  $g(t)$  是序列中的单个脉冲表达式,并且脉冲宽度  $\Delta t_p$  远小于单个持续周期  $T_R$ 。光脉冲序列首先经过一段色散,其色散量大小为  $\phi_1 = (m-1)T_R^2/2m\pi$ ,满足  $m$  阶分数阶时域 Talbot 效应条件,之后光脉冲输入到电光强度调制器,采样待测射频信号。经过调制器后的光信号经过第二段色散介质,其色散量大小为  $\phi_2 = T_R^2/2m\pi$ 。两段色散介质的总色散量满足整数阶时域 Talbot 效应条件,即  $\phi_{\text{tot}} = \phi_1 + \phi_2 = T_R^2/2\pi$ 。

为分析简便,假定待测射频信号为单频信号,即  $x(t) = a \sin(\omega_1 t)$ ,其中  $a$  为信号幅度,  $\omega_1$  为信号角频率。在载波抑制双边带调制的情况下,最终输出的信号可以表示为

$$e_{\text{out}}(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \left\{ \frac{a}{2} \left[ \exp(j\varphi_{+\omega_1}) \cdot g\left(t - kT_R - \frac{1}{2}T_R - \phi_2\omega_1\right) + \exp(j\varphi_{-\omega_1}) \cdot g\left(t - kT_R - \frac{1}{2}T_R + \phi_2\omega_1\right) \right] \right\} \quad (2)$$

式中,  $\varphi_{+\omega_1}$  和  $\varphi_{-\omega_1}$  为正负两个脉冲的相位,与输出波形幅度无关。根据式(2)可以看出,输出的信号仍为一个周期性的脉冲序列,周期大小与输入序列的周期相等,均为  $T_R$ 。输出的脉冲形状与输入的脉冲  $g(t)$  相同,能量大小与调制深度  $a$  正相关。输入信号  $x(t)$  的频率转换成脉冲时间间隔,每个频率分量  $\omega_1$  对应两个对称的脉冲。频时映射的尺度表达式为

$$\Delta t_1 = \phi_2 \omega_1 = \frac{1}{m} \frac{T_R^2}{2\pi} \omega_1 \quad (3)$$

式中,  $\Delta t_1$  是单个周期内两个脉冲时间间隔的一半。为了输出脉冲不会发生混叠现象,最大的  $\Delta t_1$  不应大于  $T_R/2$ ,即系统的频率测量带宽应满足条件

$$f_B \leq \frac{m}{2T_R} \quad (4)$$

由此可见,通过增大分数阶 Talbot 效应的阶数  $m$ ,可以提高系统的频率测量带宽。所提出系统的频率测量带宽是之前基于整数倍 Talbot 效应方案的  $m$  倍<sup>[15]</sup>。

## 2 实验与仿真结果分析

设计实验装置如图 2 所示。采用脉冲光源(Pilot Photonics LYRA-PPS-1000),设置光脉冲的重复周期  $T_R$  为 151.5 ps,即重复频率为 6.6 GHz,脉冲序列中每个脉冲包络都呈高斯形状,脉冲的半高全宽约为 30 ps。理论上,满足整数阶 Talbot 效应的色散  $|\phi_{\text{tot}}|$  为 3 654.8 ps<sup>2</sup>。利用色散补偿光纤来为系统提供色散,两段色散的总色散值约为 3 650 ps<sup>2</sup>,与理论计算得到的结果差距约为 0.1%。待测射频信号由射频信号发生器(Ceyear 1435F)产生,输出光信号经 40 GHz 带宽的光电探测器转换为电信号,由 50 GHz 带宽的采样示波器(Keysight DCA-X 86100D)记录。

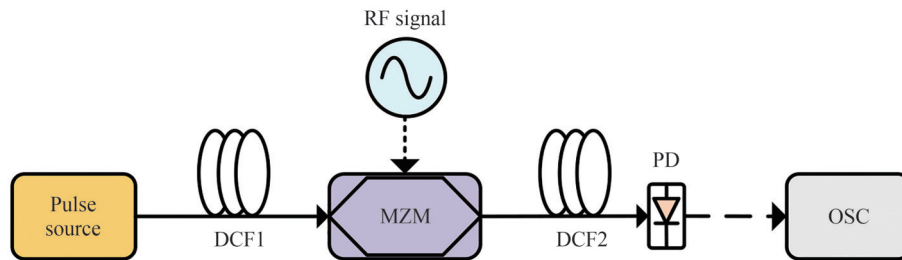


图 2 基于分数阶时域 Talbot效应的频谱分析实验装置

Fig. 2 Experimental setup for spectrum analysis based on the fractional temporal talbot effect

首先,为了直观对比整数阶和分数阶 Talbot 效应下的输出结果,设置前后两段色散量的大小,使得  $m=1$  或者  $m=3$ 。设置输入射频信号频率为 3.3 GHz,图 3(a)显示了  $m=1$  时的实验结果,由于 3.3 GHz 为其理论带宽极限,输出脉冲与输入光脉冲基本一致,脉冲时间间隔为 151.4 ps。图 3(b)显示了  $m=3$  时的实验结果,正负脉冲的时间间隔为 51 ps,缩小为图 3(a)中的 1/3 左右。需要说明的是,在图 3(a)中,前一周期的负

脉冲和后一周期的正脉冲重叠在一起,其叠加后的脉冲功率是图3(b)脉冲未重叠情况下的2倍。相比于整数阶 Talbot 效应,基于 3 阶分数阶 Talbot 效应的系统带宽提升 3 倍至 9.9 GHz。

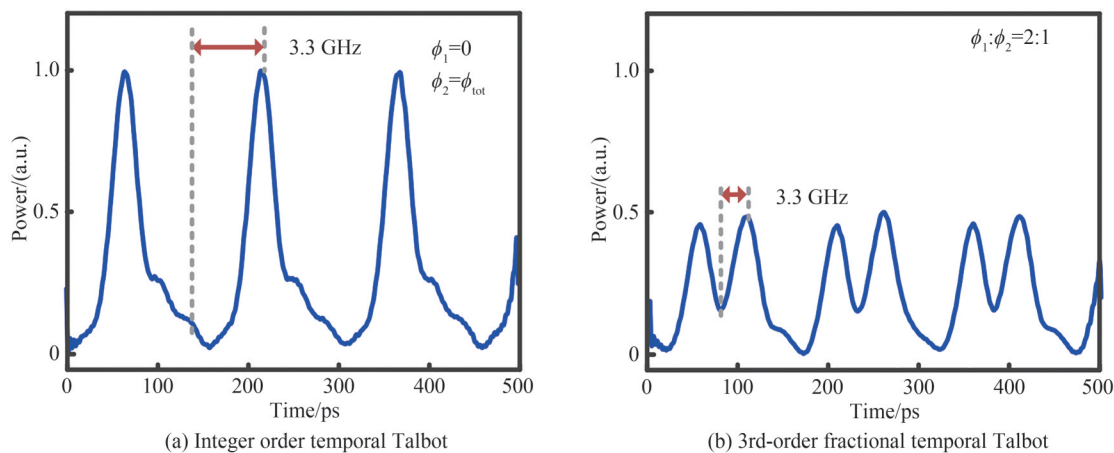


图3 整数阶和3阶分数阶时域 Talbot 效应下的输出结果

Fig. 3 Output results under integer-order and 3rd-order fractional temporal Talbot effects

为了进一步验证系统提升带宽的能力,对比分析了 3 阶和 9 阶分数阶 Talbot 效应下的结果。输入的待测信号频率均设置为理论测量带宽的一半左右,输出结果如图 4 所示。图 4(a)表示  $\phi_1:\phi_2=2:1$ ,即  $m=3$  时,输入 5 GHz 信号时的输出结果,示波器输出中读得的脉冲时间间隔为 79.8 ps,根据式(3)计算得到的频率为 5.21 GHz,测频误差约为 200 MHz。图 4(b)表示  $\phi_1:\phi_2=8:1$ ,即  $m=9$  时,输入 15 GHz 信号时的输出结果,此处的脉冲时间间隔测得为 79.5 ps,计算得到的频率为 15.58 GHz,误差为 580 MHz。注意,当  $m=9$  时,系统的测频带宽达到了 29.7 GHz,若在  $m=3$  时输入的信号频率为 15 GHz ( $>9.9$  GHz),那么就会发生脉冲混叠,无法准确获取该信号的频率信息。

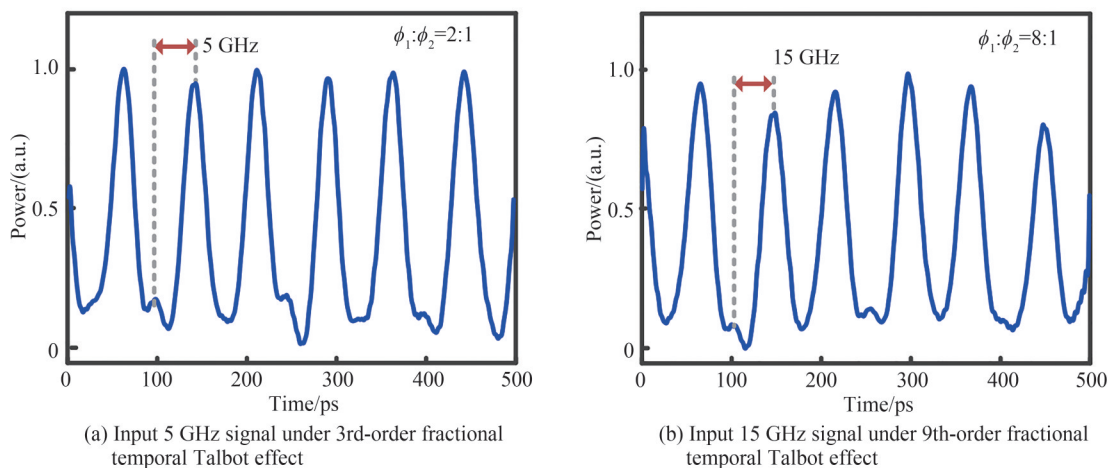


图4 不同阶数的分数阶时域 Talbot 效应下的输出结果

Fig. 4 Output results under different orders of fractional temporal Talbot effect

针对多音信号的频谱分析,在上述 9 阶分数阶时域 Talbot 效应实验条件下,将输入射频信号更改为 7 GHz 和 21 GHz 的双音信号。示波器捕捉到的结果如图 5 所示,生成的脉冲时间间隔分别为 37.4 ps 和 104.5 ps,计算得到的射频信号频率为 7.33 GHz 和 20.5 GHz,测量误差分别为 330 MHz 和 500 MHz。结果证明系统可以有效测量多音信号,每个不同的信号频率对应一对脉冲,若有多个频率分量,则在一个信号周期中出现多对脉冲,根据脉冲的出现位置,可计算得到对应的频率信息。

由于采样示波器不适用于采集非周期信号波形,设计了一个数值仿真来验证系统对频率瞬变信号的频

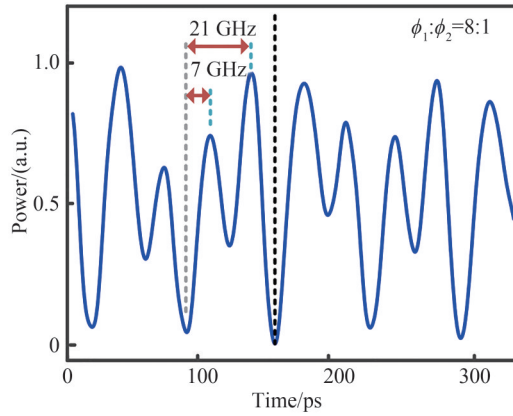


图5 9阶分数阶时域 Talbot效应下输入7 GHz和21 GHz双音信号的结果  
Fig. 5 Results of input dual-tone signals at 7 GHz and 21 GHz under 9th-order fractional temporal Talbot effect

率测量能力。设定输入光脉冲的重复频率为10 G,单个脉冲的半高全宽为5 ps。设置  $m = 3$ ,系统总的色散量  $\phi_{tot} = 1592.4 \text{ ps}^2$ ,系统的测频范围为15 GHz。输入一个线性啁啾信号,其频率范围为2~13 GHz,啁啾率为2.2 GHz/ns。图6(a)展示了3阶分数阶时域 Talbot效应下的输出波形,任意一个频率对应输出两个不同的脉冲,通过对脉冲的时间间隔即可计算得到当前的瞬时频率。图7(b)~(d)为输出脉冲序列在三个时间区间的放大图,在1 ns、2.5 ns和4 ns时,测得所对应的脉冲间隔分别为28 ps、50 ps和72 ps,根据式(4),计算得到的频率为4.2 GHz、7.5 GHz和10.8 GHz,与预期的结果一致。本次仿真实例验证了系统对ns级动态瞬变信号的频谱分析能力。

综合实验和仿真结果,系统具有实时获取动态宽带射频信号频谱信息的能力,且系统带宽随着分数阶时域 Talbot效应阶数的增大而增大。系统频率测量误差来源主要包括:输入光脉冲的时间抖动、脉冲检测

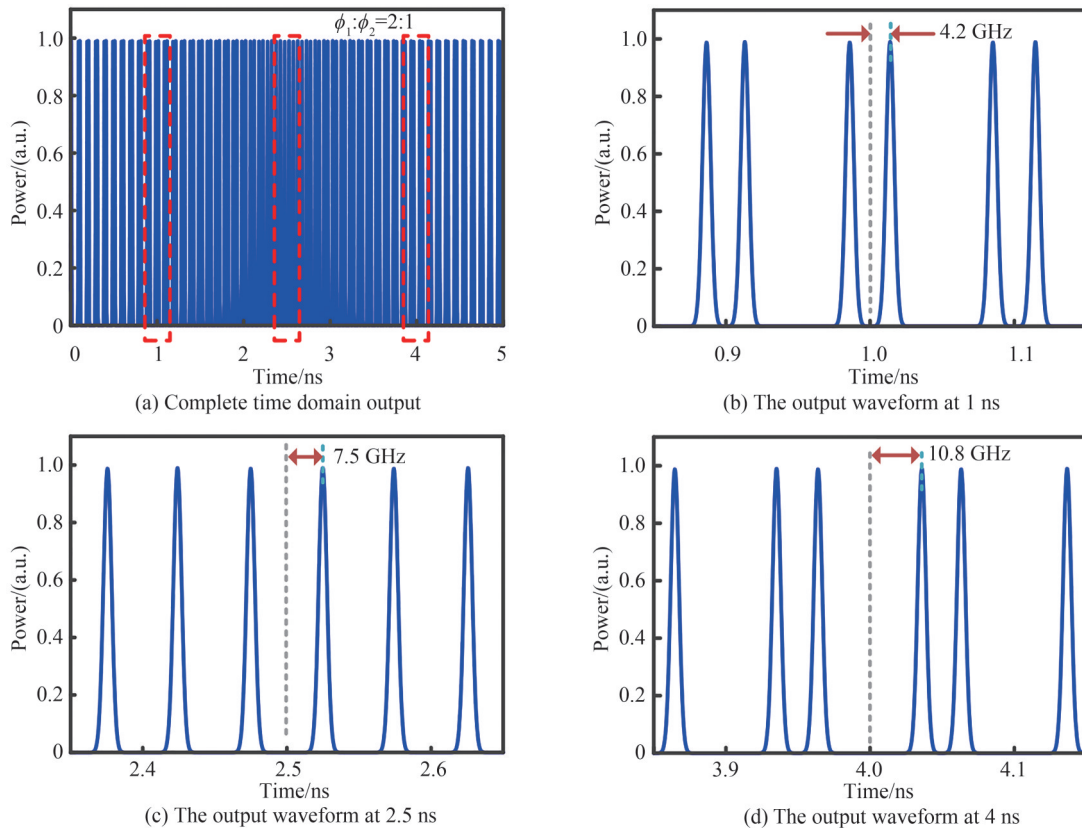


图6 3阶分数阶时域 Talbot效应下输入宽带线性啁啾信号的结果  
Fig. 6 Results of input wideband linear chirp signal under 3rd-order fractional temporal Talbot effect

系统的有限带宽、色散值与理论值存在偏差以及高阶色散项等。实验中示波器测得光脉冲的时间抖动均方根值约为 1 ps, 是光脉冲周期的 0.66%, 在测频带宽为 29.7 GHz 时, 其引起的频率测量误差约为 200 MHz。为了提高频率测量精度, 可以通过降低光脉冲抖动、增加脉冲检测系统带宽、补偿高阶色散等方式改进。需要指出的是, 系统测频带宽和频率分辨率的比值取决于脉冲周期和脉冲宽度之比, 测频带宽的增加会牺牲系统的频率分辨率。在实际应用中, 应该充分考虑系统带宽和频率分辨率的要求, 针对性地选择分数阶时域 Talbot 效应的阶数。

### 3 结论

本文提出了一种基于分数阶时域 Talbot 效应的宽带射频信号实时频谱分析方案, 借助色散和采样过程实现待测信号的实时傅里叶变换, 以实时获取频谱信息。利用分数阶时域 Talbot 效应, 可以显著提升系统的频率测量带宽。基于 9 阶分数阶时域 Talbot 效应, 实验系统准确测量了单音信号和双音信号的频率, 其测频带宽达到 29.7 GHz。所提方法具有结构简单、带宽大、可实时处理等优势, 为雷达系统、认知无线电、电子对抗等场景下的宽带频谱分析需求提供了一个潜在的解决方案。

#### 参考文献

- [1] BRYANT G H. Principles of microwave measurements[M]. IET, 1993.
- [2] CHENG Kaixin, ZHU Lei, YANG Weiwei, et al. Analysis of communication spectrum behavior in electromagnetic confrontation environment[J]. Data Acquisition and Processing, 2022, 37(3): 680-694.  
程凯欣, 朱磊, 杨炜伟, 等. 电磁对抗环境下通信频谱行为分析[J]. 数据采集与处理, 2022, 37(3): 680-694.
- [3] ZOU X H, LU B, PAN W, et al. Photonics for microwave measurements[J]. Laser & Photonics Reviews, 2016, 10(5): 711-734.
- [4] CHEN Zengping, WU Juhong, SU Shaoying, et al. Broadband real-time spectrum analysis technology and its application [J]. Signal Processing, 2012, 28(2): 151-157.  
陈曾平, 吴巨红, 宿绍莹, 等. 宽带实时频谱分析技术及其应用[J]. 信号处理, 2012, 28(2): 151-157.
- [5] KONATHAM S R, MARAM R, ROMERO CORTÉS L, et al. Real-time gap-free dynamic waveform spectral analysis with nanosecond resolutions through analog signal processing[J]. Nature Communications, 2020, 11(1): 3309-3320.
- [6] ZOU X H, CHI H, YAO J P. Microwave frequency measurement based on optical power monitoring using a complementary optical filter pair[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2009, 57(2): 505-511.
- [7] BUI L A. Recent advances in microwave photonics instantaneous frequency measurements [J]. Progress in Quantum Electronics, 2020, 69: 100237.
- [8] RUGELAND P, YU Z, STERNER C, et al. Photonic scanning receiver using an electrically tuned fiber Bragg grating[J]. Optics Letters, 2009, 34(24): 3794-3796.
- [9] SHI J, ZHANG F, ZHOU Y, et al. Photonic scanning receiver for wide-range microwave frequency measurement by photonic frequency octupling and in-phase and quadrature mixing[J]. Optics Letters, 2020, 45(19): 5381-5384.
- [10] XIE X, DAI Y, JI Y, et al. Broadband photonic radio-frequency channelization based on a 39-GHz optical frequency comb [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(8): 661-663.
- [11] YANG J, LI R, DAI Y, et al. Wide-band RF receiver based on dual-OFC-based photonic channelization and spectrum stitching technique[J]. Optics Express, 2019, 27(23): 33194-33204.
- [12] DE CHATELLUS H G, CORTÉS L R, AZAÑA J. Optical real-time Fourier transformation with kilohertz resolutions [J]. Optica, 2016, 3(1): 1-8.
- [13] SAPERSTEIN R E, PANASENKO D, FAINMAN Y. Demonstration of a microwave spectrum analyzer based on time-domain optical processing in fiber[J]. Optics Letters, 2004, 29(5): 501-503.
- [14] DUAN Y, CHEN L, ZHOU H, et al. Ultrafast electrical spectrum analyzer based on all-optical Fourier transform and temporal magnification[J]. Optics Express, 2017, 25(7): 7520-7529.
- [15] DUAN Y, CHEN L, ZHANG L, et al. Temporal radio-frequency spectrum analyzer, based on asynchronous optical sampling assisted temporal convolution[J]. Optics Express, 2018, 26(16): 20735-20743.
- [16] YANG B, WU F B, YANG S N, et al. Resolution-enhanced dynamic waveform spectral analysis based on the inverse temporal Talbot effect[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2022, 34(14): 749-752.
- [17] AZANA J, MURIEL M A. Temporal self-imaging effects: theory and application for multiplying pulse repetition rates [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2001, 7(4): 728-744.

## Real-time Spectrum Analysis of Wideband RF Signals Based on Fractional Temporal Talbot Effect

YANG Bo<sup>1,2</sup>, ZHAO Lei<sup>1</sup>, YANG Shuna<sup>2</sup>, CHI Hao<sup>2</sup>

(1 School of Information and Control Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

(2 School of Communication Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** To enhance the bandwidth and real-time capabilities of Radio Frequency (RF) spectrum analysis, the optical real-time Fourier transform method has been proposed. The optical real-time Fourier transform method based on the temporal Talbot effect has the advantage of a simple structure by using optical pulse sampling and dispersion delay structure. However, its frequency measurement bandwidth is limited by the optical pulse's repetition rate. Addressing this limitation, a real-time spectrum analysis scheme of wideband RF signals based on the fractional temporal Talbot effect is proposed and demonstrated. Based on the sampling and dispersion structure, the scheme realizes the mapping of the RF signal frequency to the optical pulse time interval. At the same time, the repetition rate of the optical pulse before sampling is multiplied by passing through a dispersive element satisfying the fractional Talbot distance in advance. The frequency measurement bandwidth of the system can be significantly improved by using the fractional Talbot effect. A proof-of-concept experiment is carried out to test the performance of the proposed scheme. The repetition period of the optical pulse is set to 151.5 ps, that is, the repetition frequency is 6.6 GHz. Each pulse has a Gaussian shape and the full width at half maximum of the pulse is approximately 30 ps. Dispersion compensation fiber is used to provide dispersion for the system. The total dispersion value of the two sections of dispersion is about  $3\ 650\ \text{ps}^2$ , which is about 0.1% different from the theoretical result. The RF signal to be measured is generated by a RF signal generator. The output optical signal is converted into an electrical signal by a 40 GHz bandwidth photodetector and recorded by a sampling oscilloscope with a bandwidth of 50 GHz. Comparing the experimental results under integer-order, 3rd-order fractional, and 9th-order fractional temporal Talbot conditions, it is verified that the measurement frequency bandwidth of the system increases with the order of the temporal Talbot effect. Real-time spectral analysis of single-tone and two-tone RF signals within a 29.7 GHz bandwidth is achieved using the 9th-order fractional temporal Talbot effect. Numerical simulation is carried out to achieve time-frequency analysis of a large-bandwidth linear chirp signal. Based on the 3rd-order fractional temporal Talbot effect, a linear chirp signal with a frequency range of 2~13 GHz and a chirp rate of 2.2 GHz/ns is successfully identified. Numerical simulation results further verify that this scheme can effectively analyze frequency transient signals. The main causes of frequency measurement errors include the time jitter of the input optical pulse train, the limited bandwidth of the pulse detection system, the deviation between the dispersion value and the theoretical value, high-order dispersion terms, etc. In the experiment, the time jitter root mean square value of the optical pulse is approximately 1 ps, which is 0.066% of the period of the optical pulse train. When the frequency measurement bandwidth is 29.7 GHz, the frequency measurement error caused by the time jitter is about 200 MHz. In order to improve frequency measurement accuracy, methods such as reducing optical pulse jitter, increasing the bandwidth of the pulse detection system, and compensating for high-order dispersion can be used. It should be noted that the increase of frequency measurement bandwidth will sacrifice the frequency resolution of the system. In practical applications, the requirements of system bandwidth and frequency resolution should be fully considered to select the order of the fractional temporal Talbot effect. With its advantages of simple structure, large bandwidth, and real-time processing, this scheme has potential application value in the fields of broadband radar, cognitive radio, and other fields.

**Key words:** Spectrum analysis; Photonic assisted radio frequency spectrum analysis; Real-time Fourier transform; Talbot effect; Fractional temporal Talbot effect

**OCIS Codes:** 060.5625; 070.1170; 070.6760; 300.6370; 300.6300