

面向 6G 的全频段实时傅里叶变换技术研究 (特邀)

李基隆¹, 段向阳^{1,2}, 范 忱^{1,2}, 吕凯林^{1,2}, 宗柏青^{1,2}

(1. 中兴通讯股份有限公司, 广东 深圳 518057;
2. 移动网络和移动多媒体技术国家重点实验室, 广东 深圳 518055)

摘要: 面向未来 6G 无线通信技术中微波信号的时频信息分析问题, 文中提出了一种基于光学离散色散器件的微波光子实时傅里叶变换系统。该离散色散器件在幅频特性上表现出周期性的窄带滤波性质, 在相频特性上表现出离散的二次相位分布。利用该色散器件可以完成光载微波信号的频时映射, 在此基础上, 可以进一步实时连续地实现对非平稳信号的时间频率信息特征提取。由于只需要实现离散的相移而不是传统色散器件的真延时, 所以可以在较小的体积内实现巨大的等效色散, 从而减小系统的处理延时。文中设计了光纤微环级联方案实现离散色散, 在此方案中单个光纤微环的环长为 4 cm, 并通过数值仿真实现了 0.8 ps/MHz 的频时映射斜率, 等效于 5800 km 单模光纤的色散大小, 频率分辨率达到了 50 MHz, 瞬时带宽为 5 GHz。以 6G 感知通信一体化中经常用到的线性调频信号为例, 仿真了系统的短时傅里叶变换功能以分析信号的时间和频率信息, 其中, 时间分辨率达到 20 ns, 频谱分析的速度高达 2.5×10^8 FTs/s, 显著优于传统的数字分析方案。

关键词: 微波光子; 实时傅里叶变换; 频时映射; 离散色散; 短时傅里叶变换
中图分类号: O438.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20211055

Research on full band real time Fourier transformation for 6G (Invited)

Li Jilong¹, Duan Xiangyang^{1,2}, Fan Chen^{1,2}, Lv Kailin^{1,2}, Zong Baiqing^{1,2}

(1. ZTE Corporation Ltd., Shenzhen 518057, China;
2. State Key Laboratory of Mobile Network and Mobile Multimedia Technology, Shenzhen 518055, China)

Abstract: In this paper, a scheme was proposed to achieve microwave photonic real time Fourier transformation based on spectrally-discrete dispersion, which aimed for the time-frequency information analysis of microwave signals in the future 6G wireless communication. The discrete dispersion media showed periodic narrowband filtering in the intensity frequency response and discrete quadratic phase distribution in the phase frequency response. Real time frequency to time mapping of microwave signals was then obtained using the discrete dispersion media. Furthermore, the time and frequency information of a non-stationary signal could be analyzed. Since only discrete phase shifts rather than continuously-changed true time delay were required, huge equivalent dispersion could be achieved with compact device to reduce the delay. An implementation based on cascaded ring resonators was proposed in this paper to achieve discrete dispersion, where fiber loops of 4 cm were used. Highly linear FTM with a slope of 0.8 ps/MHz was obtained through numerical stimulation, which was equivalent to 5800 km standard single-mode fiber. The resolution of the FTM reached 50 MHz and the unambiguous bandwidth reached 5 GHz. Taking the linear frequency modulation (LFM) signal which was often used in the

收稿日期:2021-04-12; 修订日期:2021-06-07

作者简介:李基隆,男,博士,主要从事光学实时傅里叶变换、可编程微波光子滤波器、超快光学信号处理方面的研究。

convergence of sensing and communication in 6G as an example, the short-time Fourier transform function of the system was simulated to analyze the time and frequency information of the signal. The time resolution reached 20 ns, and the speed of spectrum analysis was as high as 2.5×10^8 FTs/s, which was significantly better than the traditional DSP based schemes.

Key words: microwave photonics; real time Fourier transformation; frequency to time mapping; discrete dispersion; short time Fourier transformation

0 引言

微波信号的频谱分析是 6G 通信领域的一项关键基础技术^[1]。例如在未来 6G 的感知通信融合系统中,一体化波形常以时分、频分或二者融合的方式划分探测信号和感知信号^[2-3],在接收时通常需要在时间-频率联合域分析接收信号以实现正确区分。当前频谱分析的主流思路是先用高速模数转换器 (Analog to Digital Convertor, ADC) 将接收到的模拟信号转换成数字信号,然后再以数字信号处理 (Digital Signal Processing, DSP) 对其做快速傅里叶变换以获取频谱信息。然而这种基于数字处理的频谱分析方案在面向下一代通信技术时存在三个方面的重要缺陷。首先,瞬时带宽有限 (通常在 1 GHz 以下),虽然针对 100 MHz 量级瞬时带宽的 5G 通信而言是够用的,但对于未来 GHz 量级瞬时带宽的信号分析却是不够的。其次,实时性不足,难以保证 100% 无遗漏地分析时长在毫秒及更短量级信号的信息,不利于短干扰信号的排除。最后,体积重量功耗 (Size Weight and Power, SWaP) 代价高,数字处理方案在带宽、分辨率等方面的性能严重依赖于算力资源的堆积,这会在未来汽车等移动应用场景中造成严重障碍。为此,人们逐渐将目光转向光子技术,利用光超大带宽和超低损耗的天然优势去扩大频谱分析的带宽、提升帧采集速率^[4]。例如,采用时间拉伸技术或者光学采样技术可以实现超宽带 ADC,但巨大的数据量同样意味着难以容忍的处理延时。而另一种受到广泛关注的思路是将信号的频谱信息映射到频率外的其他维度,从而可以在该维度上直接测量,而频时映射是其中一种有效的分析方案。

频时映射 (Frequency to Time Mapping, FTM),有时也被人们称之为实时傅里叶变换 (Real-time Fourier Transform, RTFT),将频谱信息映射到时间维度上,从

而使输出信号的时域包络正比于输入微波信号的频谱形状^[5],之后可以通过示波器或 ADC 直接读取输入信号的宽带频谱信息,因此可以节约宝贵的数字算力资源。通常情况下,频时映射都是通过二阶色散 (文中简称为色散) 来完成的,利用频率不同的光在色散介质中的传输速度不同来实现频率到时间的映射过程。通过电光调制器将微波信号调制到一个时长较长的线性啁啾光脉冲上,对啁啾光信号引入频移,之后经过一段匹配的色散介质。色散一方面对光信号施加一个与频移成正比的延时,另一方面将长的啁啾光脉冲解啁啾,压缩成窄脉冲,从而使不同延时的脉冲能够被示波器区分开来。频时映射中的一个关键元素就是色散,虽然光学色散器件,比如色散补偿光纤、光纤布拉格光栅等,相比于射频色散器件能够有更大的工作带宽并且能提供更大的色散,但在针对微波信号的频谱分析而言,色散值依然不够大。以标准单模光纤为例,倘若想要区分两个频率差为 25 MHz 的微波信号,使其频时映射的延时差为 20 ps (这已经几乎是商用实时示波器能达到的最小时间分辨率),需要 1×10^5 ps/nm 大小的色散,相当于 5800 km 标准单模光纤提供的色散值。为了解决常规色散器件色散值不够大的问题,人们提出了各种思路以实现等效的超大色散或者采取其他措施降低频时映射对色散的要求。加拿大 Azana 团队利用光学色散和宽带激光源实现了超大色散^[6];华中科技大学张新亮团队在频时映射的时域输出之后附加时间拉伸技术改善频时映射的时间分辨率,进而降低了系统对色散值的要求^[7]。

文中提出一种离散色散的方案以实现实时傅里叶变换,这种离散色散介质的幅频特性为周期性窄带滤波形状,相频在带通处的特性与传统色散介质近似。这里采用无源光纤微环来等效色散,一方面可以获得极大的色散值,另一方面避免了传统光色散介质

(如光纤)可能带来的巨大的伴随延时。以长度约为 4 cm 的光纤微环级联方案为例,仿真分析表明,频带映射的分辨率可达到 50 MHz,瞬时带宽可以达到 5 GHz。为了研究所提方案对非平稳信号的时间-频率联合域分析能力,仿真了针对线性调频信号、通信信号中混杂瞬时干扰信号的短时傅里叶变换功能,结果表明该方案能以 20 ns 的时间分辨率对非平稳信号进行不间断无遗漏的时频分析。

1 理论分析

传统的连续色散一般用频域的传递函数描述,是一个幅频特性为全通,相频为二次函数 $\exp(i\beta_2\omega^2/2)$ 的特殊滤波器,其中 β_2 表示色散大小。以 FSR_{DD} 为离散周期, $P(\omega)$ 为频域采样函数对其进行频域离散,得到离散色散, $\exp(i\beta_2\omega^2/2) \sum_k P(\omega - k \cdot FSR_{DD})$ 。可以将其理解为连续色散之后接一个周期性窄带滤波器。基于离散色散的实时傅里叶变换装置图如图 1 所示。将啁啾微波信号通过电光相位调制器 (Phase Modulator, PM) 调制在连续光 (Continuous Wave, CW) 上,然后通过单边带光滤波器 (single sideband filter, SSB filter) 滤出其中一个边带,得到啁啾光信号。之后,将待分析的输入微波信号通过载波抑制单边带格式 (Carrier Suppressed Single Sideband, CS-SSB) 调制到啁啾光信号上,接下来的离散色散器件对频移的啁啾光信号解啁啾,将其压缩成周期性的脉冲,每个周期内脉冲的延时正比于输入微波信号的频率。假设输入微波信号为 $x(t)$,那么离散色散之后的输出信号可以表示为:

$$x(t) e^{i\frac{t^2}{2\beta_2}} \otimes F^{-1} \left\langle e^{i\frac{\beta_2}{2}\omega^2} \cdot \sum_k P(\omega - k \cdot 2\pi FSR_{DD}) \right\rangle \otimes e^{-i\frac{t^2}{2\beta_2}} X\left(\frac{t}{\beta_2}\right) \otimes F^{-1} \left\langle \sum_k P(\omega - k \cdot 2\pi FSR_{DD}) \right\rangle \otimes \sum_k p\left(\frac{k}{FSR_{DD}}\right) X\left[\frac{(t - k/FSR_{DD})}{\beta_2}\right] e^{-i\frac{(t - k/FSR_{DD})^2}{2\beta_2}} \quad (1)$$

式中: $e^{i\frac{t^2}{2\beta_2}}$ 表示啁啾光信号,与色散相匹配; $p = F^{-1} \langle P(\omega) \rangle$ 为频域采样函数 $P(\omega)$ 的反傅里叶变换; $p(k/FSR_{DD})$ 表示 $p(t)$ 在 $t = k/FSR_{DD}$ 处的取值。从公式 (1) 可以看出,用离散色散替换连续色散之后,得到了输入信号

的周期性频带映射结果,输出的周期大小为 $1/FSR_{DD}$ 。由于输出是周期性的,每个周期都是输入微波信号的一次频带映射结果,所以为了保证相邻的两个周期不会相互干扰,观测窗口必须限制在 $T_{osc} = 1/FSR_{DD}$ 以内。假设输入两个频率间隔为 Δf 的微波信号,在一个输出周期内,它们频带映射的输出延时差为 $\Delta t = 2\pi\beta_2\Delta f$ 。因此,有限的观测窗口决定频带映射的带宽不能超过

$$B_{FTM} = \frac{1}{2\pi\beta_2 FSR_{DD}} \quad (2)$$

频带映射的频率分辨率, RBW , 取决于啁啾光信号解啁啾之后的时长。假设啁啾光信号的带宽为 B_0 (此带宽在图 1 所示的方案中等于啁啾微波信号的带宽),根据傅里叶变换的相关性质可知,其解啁啾之后的时长约为 $1/B_0$,因此频带映射的分辨率为:

$$RBW = \frac{1}{2\pi\beta_2 B_0} \quad (3)$$

公式 (1) 描述的理想离散色散中,每个通带内的相位均符合连续色散的相位特性,是连续变化的。为了方便地实现离散色散,文中将每个通带内的相位近似为恒定值,而使通带间的相位分布符合平方分布特性,即作如下近似:

$$\exp\left(\frac{i\beta_2\omega^2}{2}\right) \sum_k P(\omega - k \cdot 2\pi FSR_{DD}) \approx \sum_k \exp\left(\frac{i\beta_2(k \cdot 2\pi FSR_{DD})^2}{2}\right) \cdot P(\omega - k2\pi FSR_{DD}) \quad (4)$$

如此,只需要设计每个通带中心频率处的相移值,而不需要设计通带内部连续变化的相位曲线。假设

$$M = B_{FTM}/FSR_{DD} \quad (5)$$

并将 M 设为正整数,根据公式 (2) 可知,此时等效色散为 $\beta_2 = M/(2\pi B_{FTM}^2)$,每个通带的中心频率处,

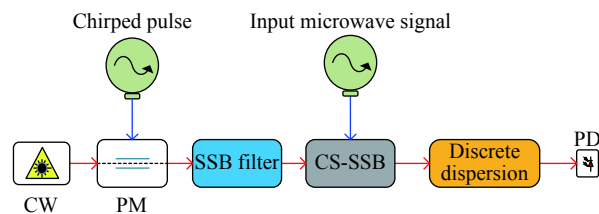


图 1 基于离散色散的实时傅里叶变换框架图

Fig.1 Simulation setup of the real time Fourier transformation based on discrete dispersion

$k \cdot FSR_{DD}$ 的相移值为:

$$\phi_k = kM\pi + \frac{k^2\pi}{M} \quad (6)$$

式中: $kM\pi$ 为添加的前缀项。考虑到当 M 为偶数时, $kM\pi$ 等效于 0; 当 M 为奇数时, $kM\pi$ 等效于 $k\pi$, 而 $k\pi$ 等效于一个大小为 $1/(2FSR_{DD})$ 的固定延时。所以添加前缀项不影响离散色散的设计。

如公式 (6) 所示的离散相位序列符合周期性条件, $\phi_{k+M} = \phi_k$, 即离散的相位值每经过 M 个信道就会重复一次。在此情况下, 文中提出用如图 2 所示的 M 对级联光纤微环来实现离散色散。所有微环的自由光谱范围 (Free Spectral Range, FSR) 均等于 B_{FTM} 。控制第 m 对微环, $m \in [1, M]$, 使其中心频率为 $f_m = (mB_{FTM})/M$, 相移值 $\phi_m = mM\pi + m^2\pi/M$, 第 m 对微环用来实现公式 (4) 中的第 m 个通带。需要指出的是, 每个信道的通带 $P(\omega)$ 必须足够窄才能保证公式 (4) 中近似的成立。因此, $P(\omega)$ 的带宽决定了系统频时映射分辨率的上限。

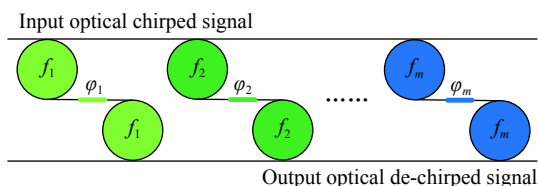


图 2 基于级联光纤微环的离散色散设计方案

Fig.2 Scheme to realize discrete dispersion based on cascaded optical ring resonators

这种离散色散相对于传统连续色散有两个主要优势。第一, 由于只需要设计离散的相移值而不是传统色散中针对连续频率的真延时, 离散色散可以在实现巨大色散的同时只带来极小的传输延时, 在频谱分析的实时性方面有着重大优势。第二, 这种无源光纤微环级联结构相较于有源结构更容易通过集成进一步降低体积和重量, 同时提高稳定性。

2 结果分析

文中通过数值仿真说明方案的可行性。设置频时映射的瞬时带宽 $B_{FTM} = 5 \text{ GHz}$, 分辨率 $RBW = 50 \text{ MHz}$ 。设 $M = 20$, 结构如图 2 所示, 光纤微环的个数为 40。根据公式 $\beta_2 = M/(2\pi B_{FTM}^2)$ 可知此时等效色

散大小为 $1.27 \times 10^5 \text{ ps}^2$, 相当于 5800 km 标准单模光纤对应的色散大小。每个微环的 FSR 均为 5 GHz, 对应的环长为 4 cm, 环路延时为 0.2 ns。假设微环光纤的损耗为 0, 环形波导与直臂波导之间的耦合效率为 4.8%。每对光纤微环的中心频率以及相移均根据公式 (4) 对应的条件精确调整。仿真装置图如图 1 所示, 啁啾微波信号的带宽根据公式 (3) 可知为 25 GHz, 时长为 20 ns。

文中首先输入一系列频率范围位于 $[0, 5 \text{ GHz}]$ 单频信号以验证频时映射的线性度及分辨率。输出结果展示在同一张图上, 如图 3(a) 所示。图中黑线表示未给啁啾光信号施加频移时对应的输出波形。可以观测到周期性的输出结果, 周期为 4 ns, 与公式 (1) 相吻合。由于系统设置时, 啁啾光信号只持续 20 ns, 所以两端的输出呈现出功率衰减的形状。输出中单独一个周期的放大结果如图 3(b) 所示, 每个颜色的脉冲均对应一个不同频率的输入单频信号。图 3(d) 中每个颜色的点均对应一对输出延时和输入频率 (由图 3(b) 得到), 可以看到频时映射的符合良好的线性关系, 且与黑色直线代表的理论值及其吻合。图 3(c) 中的两个脉冲分别对应的输入信号频率为 0 GHz 和 0.05 GHz, 两个脉冲的间距近似等于单个脉冲的半高全宽, 表明系统的频率分辨率达到了 50 MHz。

在分析动态信号的时间和频率信息时, 短时傅里叶变换是一项关键的技术。短时傅里叶变换的表达式为

$$X(\Omega, t) = \int x(\tau) w(\tau - t) e^{i\Omega\tau} d\tau \quad (7)$$

式中: $x(t)$ 为待分析的输入信号; $w(t)$ 代表时间截断窗口; $X(\Omega, t)$ 表示时间截断之后信号 $x(\tau)h(t - \tau)$ 的傅里叶变换。随着时间 t 的改变, 时间截断窗口不断移动, 截取输入信号的不同时段, 得到信号不同时段的频谱信息。如图 1 所示的 setup 图中, 如果将啁啾光信号设置为周期性重复的连续啁啾信号, 系统则可以实现短时傅里叶变换功能, 用以分析动态信号的时频信息。啁啾信号的持续时间 T_0 即为矩形时间截断窗口的窗口大小代表系统的时间分辨率 δt_r 。由于前后两端啁啾光信号在时序上不能混叠, 所以时间截断窗口的最小移动步进同样为 T_0 。值得一提的是, 频时映射的周期 T_{OSC} 小于时间截断窗口的移动步进 T_0 , 时间

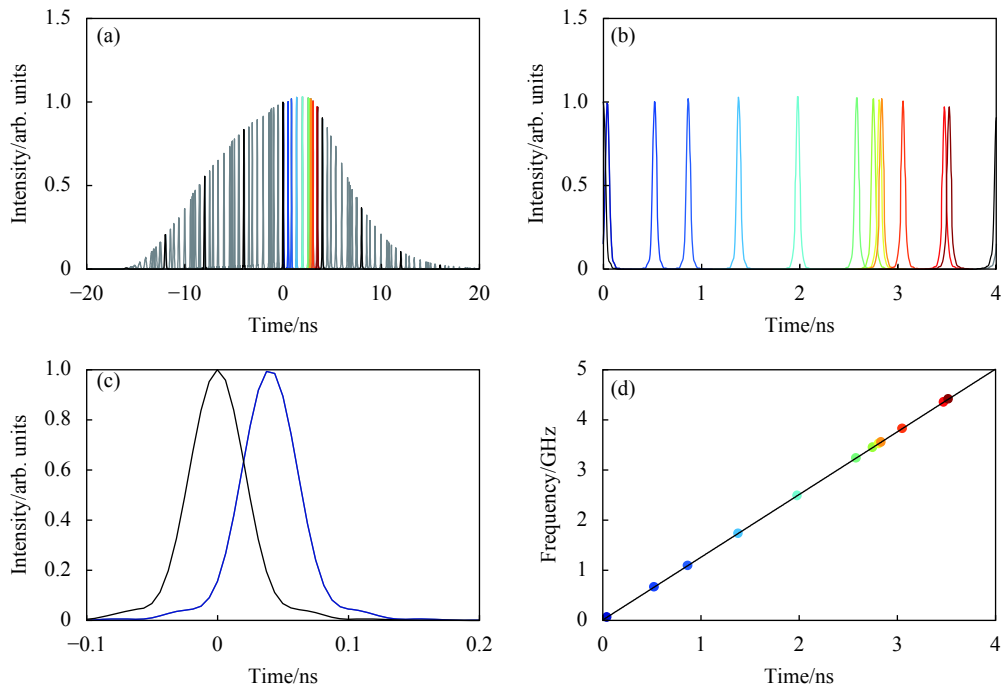


图 3 基于离散色散的频时映射仿真结果。(a) 周期性频时映射输出结果; (b) 周期性输出的其中一个周期, 不同颜色表示不同频率输入信号的输出; (c) 输入频率为 0 GHz (黑色) 和 50 MHz (蓝色) 时的频时映射图; (d) 仿真结果计算的频时映射 (不同颜色的点图) 与理论频时映射 (黑色直线)

Fig.3 Simulated FTM based on discrete dispersion. (a) Periodic FTM output; (b) Zoom in one period, waveforms of different color correspond to different input frequencies; (c) FTM outputs under 0 (black line) and 50 MHz (blue line) frequency shift; (d) Calculated FTM of simulation (colorful dots) and theory prediction (black line)

截断窗口每移动一次, 系统均会输出多次频谱分析结果, 将每次频谱分析结果以相应的时间先后顺序综合起来, 即可得到输入信号的二维时频联合域分析结果。

在前一个仿真的基础上, 将啁啾信号设为周期性重复, 占空比为 100%, 其余参数不变, 用以分析动态信号的时频信息。啁啾信号时长为 20 ns, 因此时间分辨率 $\delta t_r = 20 \text{ ns}$ 。因为傅里叶变换每 4 ns 完成一次, 所以频谱分析的速度为 $2.5 \times 10^8 \text{ FTs/s}$, 远优于目前先进水平的商用时频分析仪器的速度^[8]。

以感知通信一体化中经常使用到的线性调频信号为例, 输入一个时长为 1 μs 、瞬时频率从 0 GHz 增加到 5 GHz 的线性调频信号, 仿真结果如图 4(a) 所示。从二维时频联合域分析结果中可以清晰地观察到瞬时频率随时间线性增加, 准确地反应了输入信号的时频特征。在感知通信融合的一体化波形设计中, 部分研究人员提出使用两个幅度相同频段相同啁啾

率相反的线性调频信号分别作为感知和通信信号, 这同样可以用文中提出的实时傅里叶变换系统加以分析。输入瞬时频率在 1 μs 内从 0 GHz 增加到 5 GHz 和从 5 GHz 减小到 0 GHz 的两个线性调频信号 (幅度相同), 输出的时频联合分析结果如图 4(b) 所示, 可以清晰无误地分辨出两个线性调频信号。图 4(c) 展示的是感知中使用到的另一种信号——跳频信号 (幅度相同) 的分析结果, 同样可以明确地检测到各个信号的时段和频率信息。另外, 在通信环境中, 存在各种干扰信号, 其中一些持续时间短 (例如, 低于 1 μs) 难以被传统分析手段鉴别出来。为了分析文中方案捕捉瞬时干扰信号的能力, 输入信号被设置为线性调频信号中夹杂一些干扰信号 (信号的幅度均相同), 输出波形的二维时频联合域分析结果如图 4(d) 所示。可以看到, 持续时长仅为 20 ns 的干扰信号可以从结果中清晰地分辨出来, 这同时也表明系统实现短时傅里叶变换的时间分辨率达到了 20 ns。

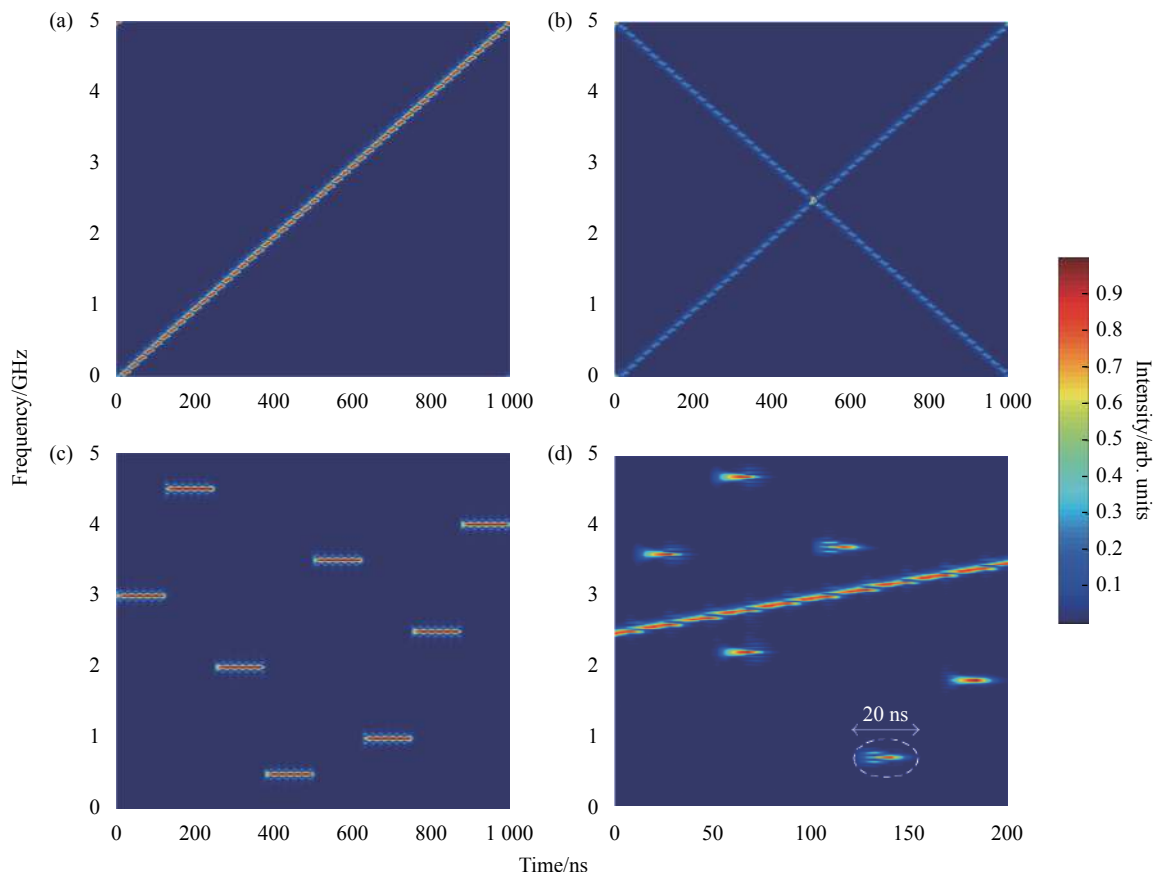


图 4 输入不同信号对应的二维时频联合域分析结果。(a) 输入为线性调频信号; (b) 输入为两个啁啾率相反的线性调频信号; (c) 输入为跳频信号; (d) 输入为线性调频信号混杂 6 个干扰信号

Fig.4 Two-dimensional analysis of joint time-frequency energy distribution of different input signals. (a) The input is a linear chirped signal; (b) The input is two linear chirped signals with opposite chirping rate; (c) The input is frequency hopping signal; (d) The input is a linear chirped signal together with random isolated interfering frequency transients

3 结 论

综上所述,文中提出了一种基于离散色散的实时频谱分析方案。仿真结果表明,使用 20 对环长为 4 cm 的光纤微环,能够实现瞬时带宽为 5 GHz,分辨率达到 50 MHz 的实时傅里叶变换,频时映射线性度良好,斜率为 0.8 ps/MHz。与传统基于连续色散的频时映射相比,这种离散色散设计可以在有限的体积内实现巨大的色散,可实现 1×10^5 ps/nm 大小的色散(等效于 5800 km 长标准单模光纤提供的色散大小)。光信号经过离散色散器件的延时约为 23 ns,而同样色散大小的标准单模光纤的延时约为 32 ms。这种无源设计使得离散色散器件的未来集成实现成为可能。该方案可以用来分析非静态信号,文中通过仿真

证明了系统能以 20 ns 的时间分辨率无遗漏地分析动态信号的时间和频率信息,频谱分析的速度高达 2.5×10^8 FTs/s,远远超过当前商用仪器的速度,在未来 6G 感知通信一体化领域有着重要的应用前景。

参考文献:

- [1] Zong B, Fan C, Wang X, et al. 6G technologies: Key drivers, core requirements, system architectures, and enabling technologies [J]. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 2019, 14(3): 18-27.
- [2] Zhao Yuzhen, Chen Longyong, Zhang Fubo, et al. A new method of joint radar and communication waveform design and signal processing based on OFDM chirp [J]. *Journal of Radars*, 2021, 10(3): 453-466.
- [3] Liang Xingdong, Li Qiang, Wang Jie, et al. Joint wireless communication and radar sensing: Review and future pro-

- spects [J]. *Journal of Signal Processing*, 2020, 36(10): 1615-1627.
- [4] Konatham S R, Maram R, Cortés L R, et al. Real-time gap-free dynamic waveform spectral analysis with nanosecond resolutions through analog signal processing [J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 1-12.
- [5] Goda K, Jalali B. Dispersive Fourier transformation for fast continuous single-shot measurements [J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(2): 102-112.
- [6] Park Y, Azaña J. Optical fiber system for real-time Fourier transformation of nanosecond-long broadband microwave waveforms[C]//2010 IEEE International Topical Meeting on Microwave Photonics. IEEE, 2010: 171-174.
- [7] 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.
- [8] Keysight Technologies. Keysight Real-time Spectrum Analyzers N9040B[EB/OL].[2017-12-01].<https://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5991-1748EN.pdf?id=2303225>.