光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2023113001

# 离散色散光域傅里叶变换的延时和带宽扩展研究

梁会娟[1*]，王　凯[1]，韩守保[1]，梅　理[2]，田朝辉[1]，张　静[1]，崇毓华[2]

（1. 中国电子科技集团公司第三十八研究所 微波技术研发中心，合肥 230088；
2. 安徽省天线与微波工程实验室，合肥 230088）

**摘　要：** 光域傅里叶变换为射频频谱分析提供了一种新的解决方案。光域傅里叶变换主要受限于大的二阶色散的获得，而离散傅里叶变换只需要控制离散点的相位，理论上可以解决大色散的获得问题。文章利用光纤环作为离散色散器件，用线性调频信号作为待测信号，进行了光域离散傅里叶变换的研究。该系统是一个快速傅里叶变换系统，每次变换用时约 2.07 ns。用示波器观测线性调频信号变换前与变换后的波形延迟，可以测出该系统的变换延时，约为 100 ns，其延时大小主要取决于系统中的光纤长度。该系统可以实现对信号的不间断处理。为了扩展系统的瞬时带宽，对片上集成光微环组方案的可实现性进行了分析。

**关键词：** 频时映射；光域傅里叶变换；微波光子；离散色散

**中图分类号：** TN98；O438.1　**文章编号：** 1001－5868(2024)02－0274－06

## Delay and Bandwidth Expansion of Discrete Dispersive Fourier Transform in the Optical Domain

LIANG Huijuan[1], WANG Kai[1], HAN Shoubao[1], MEI Li[2], TIAN Zhaohui[1], ZHANG Jing[1], CHONG Yuhua[2]

（1. Microwave Technology R&D Center of the 38th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Hefei 230088, CHN; 2. Anhui Antenna and Microwave Engineering Laboratory, Hefei 230088, CHN）

**Abstract:** Objective The optical-domain Fourier transform provides a new solution for radio-frequency spectrum analysis. While this transform is limited by the acquisition of a large second-order dispersion, the discrete Fourier transform needs to control only the phase of discrete points, which can theoretically solve the problem of obtaining a large dispersion. Methods This study used a fiber optic ring as a discrete dispersion device and a linear frequency modulation signal as the test signal to study the optical-domain discrete Fourier transform. Each transformation in this fast Fourier transform system takes approximately 2.07 ns. By observing the waveform delay of the linear frequency modulation signal before and after transformation using an oscilloscope, the transformation delay of the system (～100 ns) can be measured. The feasibility of the on-chip integrated optical microring group scheme was examined to expand the instantaneous bandwidth of the system.

**Key words:** frequency time mapping; optical-domain Fourier transform; microwave photons; discrete dispersion

## 0　引言

电磁频谱信号的分析无论在 6G 通信领域还是军事领域都是一项关键基础技术[1]。目前，频谱分析的主要手段是将接收到的信号进行模数转换，然后在数字域对其做傅里叶变换以获取频谱信息。通

**收稿日期：**2023－11－30.
**基金项目：**国家重点研发计划项目(2019YFB2203200)；安徽省重点研究与开发计划项目(202104a05020052).
* **通信作者：**梁会娟

过高速模数转换器(Analog to Digital Convertor, ADC)和数字信号处理(Digital Signal Processing, DSP)来实现这一过程。这种方案目前的缺陷在于：瞬时带宽受到采样率的制约，同时实时性不足，响应时间较长。若要提高采样率和实时性，需要付出体积重量功耗的更高代价。微波光子技术由于其超大带宽和超低损耗也被认为是未来实现宽带快速频谱分析的技术手段之一[2-5]。微波光子进行频谱分析的路径有延时自相关方法、光子循环移频方法、基于色散的实时傅里叶变换方法等。延时自相关法将待测信号中的频率信息转换为功率信息，建立起频率与功率之间的映射关系，缺点是只能同时接收一个载频信息。光子循环移频法可以实现较宽的带宽和较精细的频率分辨率，但测频时间为毫秒级，不能满足瞬时测频的要求[6]。光信道化可以将宽带信号信道化为窄带信号，后续也需要进行电上的数字化采样，再完成测频工作。基于色散的实时傅里叶变换方法是将频率信息映射到时域进行探测，主要受限于大色散器件的获得[7-8]。北京邮电大学团队提出基于离散色散的光域傅里叶变换技术，将连续的色散离散化，通过控制离散采样点的光相位来实现色散的获得[9-10]。该方法从理论上可以获得较宽的带宽和较好的频率分辨率。本文通过对线性调频信号的测试，研究了决定测频系统测频时间的因素。为了扩大系统的瞬时带宽，分析了利用集成微环实现离散傅里叶变换的可实现性。

## 1　光域频时映射原理

通过载波抑制单边带调制，将一个射频信号 $x(t)$ 加载到一段啁啾光载波上(啁啾信号对光信号进行二次时域相位调制，对应于空间成像中的透镜)，然后经过一个色散大小与时间透镜匹配的色散介质。系统原理框图如图 1 所示。

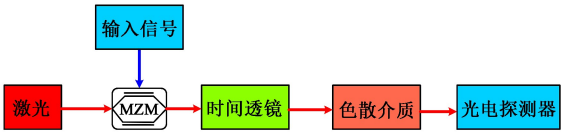



图 1　光域频时映射原理框图

那么输出的时域波形就会和输入的频谱一致。数学表达式如下：

$$y(t)=x(t)\mathrm{e}^{\frac{\Delta t^2}{2\beta_2}}\otimes F^{-1}\langle \mathrm{e}^{\frac{\Delta\beta_2 w^2}{2}}\rangle=\sqrt{\frac{\mathrm{i}}{2\pi\beta_2}}\mathrm{e}^{-\mathrm{i}\frac{t^2}{2\beta_2}}X\left(\frac{t}{\beta_2}\right) \tag{1}$$

式中，$\beta_2$ 为色散介质的二阶色散量，$w$ 为光的相位，$\exp(-\mathrm{i}t^2/2\beta_2)$ 可视作时域上的啁啾相位，其对信号包络并无影响，因此在只考虑信号强度的情况下，可以将其忽略。$X(t)$ 为 $x(t)$ 的傅里叶变换形式。在忽略啁啾相位后，输出端的时域信号仍为输入信号的频谱的线性映射，能够完成实时傅里叶变换。实际系统设计中，可以先加射频信号，再调制啁啾信号，也可先进行啁啾信号的调制，再加载射频信号。从上面的公式中可以看出，输入的啁啾信号的带宽 $B_0=\dfrac{t}{2\pi\beta_2}$。因为啁啾信号的时长和带宽都是有限的，假设啁啾光载波的带宽为 $B_0$，变换后输出的脉冲宽度为 $1/B_0$。假设输入的是两个间隔为 $\Delta f$ 的双音信号，输出的是两个间距为 $\Delta t$ 的脉冲，两个脉冲的间距 $\Delta t=2\pi\Delta f\cdot\beta_2$。系统的分辨率 RBW 由系统的色散和输入的线性调频信号的带宽决定：

$$RBW\simeq\frac{1}{2\pi B_0\beta_2} \tag{2}$$

利用此方法实现频时映射的难点在于大的色散量 $\beta_2$ 的获得，由简单的估计可知，假设所用的线性调频信号带宽为 25 GHz，如果变换分辨率要达到 25 MHz，那么需要的累积色散值为 $2.54\times10^5\ \mathrm{ps}^2$，在 1 550 nm 附近也就是 200 ns/nm，如果利用标准单模光纤来实现该色散，那么光纤长度要达到 11 600 km，它引起的损耗和处理延时，显然是不能接受的。因此提出通过离散色散的方法来实现大的色散量。离散色散的理论，李基隆等[1]做过详细的论述，这里不再进行详细分析。

## 2　测量离散色散光域傅里叶变换的延时

本实验中的离散色散通过两个 95∶5 的光耦合器来实现，如图 2 所示。光纤环路长为 40 cm，光纤折射率为 1.46，损耗系数定义为光绕环一圈后出射光强度与入射光强度的比值，考虑到两个熔接点的熔接损耗约为 0.2 dB，0.2 dB损耗对应损耗因子

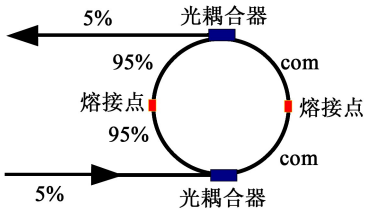



图 2　光纤环的结构

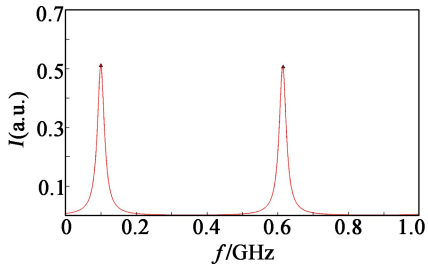



图 3 光纤环的透射谱仿真

$\alpha=0.955$，这里按照 0.96 进行仿真[11-14]，可得到自由光谱范围 $FSR=515$ MHz，半峰宽为 25 MHz 的下载端透射谱，如图 3 所示。

由于下载端每个透射峰中心处的相位相差 $\pi$，因此每个离散的透射峰的相位满足随频率成二次方变化的关系[11]。通过该光纤环可以实现的色散量 $\beta_2$ 为：

$$\beta_2=\frac{1}{2\pi FSR^2} \tag{3}$$

实际测试中所用光纤环的自由光谱范围为 483 MHz，实现的色散值 $\beta_2=6.82\times10^5\ \mathrm{ps}^2$，相当于约 31 460 km 的普通单模光纤产生的色散。测试链路如图 4 所示，激光器的光进入工作在低偏点的铌酸锂调制器，调制上周期性的啁啾信号。啁啾信号由 M8195A 任意波形发生器产生。啁啾信号中心频率为 10 GHz，信号频宽为 11.91 GHz，时宽为 50 ns，周期为 80 ns。该线性调频信号的啁啾率为 238.26 MHz/ns，该啁啾率与离散色散器件所能实现的色散大小相匹配。调制啁啾信号的光再经过光滤波器，光滤波器的作用是保留其中一个边带作为后续的光载波。通过滤波器之后的光载波通过 1∶99 的耦合器，其中 1% 的啁啾光作为参考信号，99% 的啁啾光进入双平行铌酸锂调制器，将待测信号通过单边带调制的方式调制到光载波上。之后，调制完待测信号的光波与参考光波通过光耦合器进行耦合，进入掺铒光纤放大器(EDFA)进行放大，放大后的信号进入离散色散模块，用光电探测器探测其输出信号，用示波器 DSOZ592A 进行信号的采集。

在此系统中单边带的啁啾光脉冲充当了载波信号，单边带调制的待测信号其实是对光载波的移频，之后的离散色散模块，实现对啁啾光信号的脉压功能，不同频率的信号被压缩到时间轴上的不同位置。

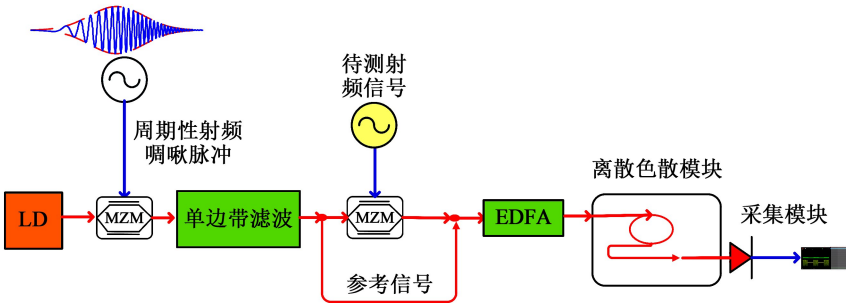



图 4 用光纤环进行离散傅里叶变换的实验系统

图 5 是向系统里分别注入 8.35，8.4 和 8.5 GHz 的射频信号，系统的时域输出结果对参考峰的时间进行了对准。可以看到参考峰和待测信号在时间轴上都是周期性出现的。该系统相当于每 2.07 ns 完成一次光域傅里叶变换。可以测量待测信号形成的时间脉冲与参考信号形成的时间脉冲之间的时间间隔 $\Delta t$，通过公式 $\Delta t=2\pi\Delta f\cdot\beta_2$，计算出频率差 $\Delta f$。再通过输入一已知信号进行定标，可以计算出待测信号的频率。由于整个系统相当于连续色散的离散化，因此系统的观测带宽有限，观测带宽为 483 MHz。当输入的多个信号频率间隔超过 483 MHz 时，就会出现频率之间的混淆。

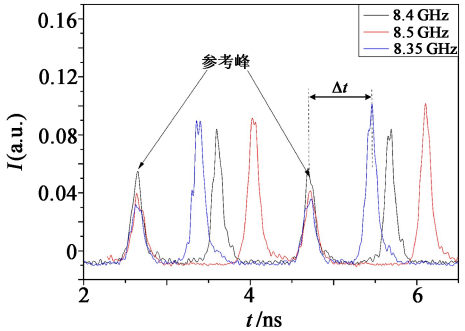



图 5 输入 8.35，8.4 以及 8.5 GHz 信号时系统的频时映射结果

为了验证系统对复杂信号的处理能力并测量系统的处理延时，将待测信号换成周期为 2 μs、脉宽为 1 μs 的线性调频信号，信号的中心频率为 8.45 GHz，信号的带宽为 300 MHz。频时映射的结果和线性调频信号分别进入示波器的两个通道进行观测，如图 6 所示。图 6 中上方测试曲线为信号的频时映射

结果，下方测试曲线是线性调频信号直接在示波器上的显示结果。可以看出，在无信号输入的时间段，上方测试曲线只有相对比较弱的参考信号；当线性调频信号达到后不久可以观测到较强的由待测信号形成的时域脉冲。因为载波抑制单边带调制在无信号输入时，工作在载波抑制状态，出光功率较低，表现出来就是参考信号的光强较弱；当有待测信号输入时，出光功率提高，表现出来就是待测信号形成的脉冲较强。

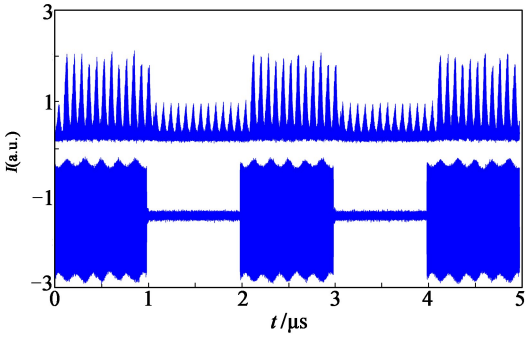



图 6　待测信号为线性调频信号的频时映射结果

对图 6 中的信号部分进行了放大，如图 7 所示。可以看到从线性调频信号的上升沿开始到频时映射信号，系统的处理延时约为 100 ns。该延时大小主要由频时映射系统中的光纤长度决定。100 ns 对应约为 20 m 的光纤长度。从加载待测信号到进入光电探测器中间有掺铒光纤放大器(EDFA)，EDFA 中的光纤长度加上中间的连接跳线约为 20 m。

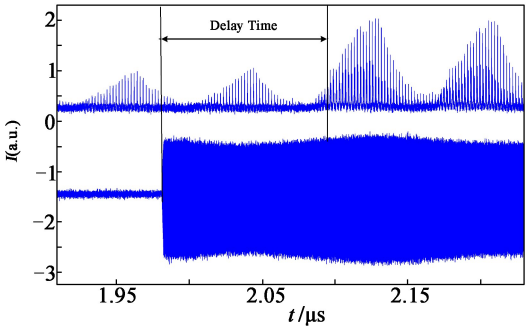



图 7　频时映射的延时测量结果

利用 Matlab 对示波器采集的信号进行处理。测量每个变换周期内信号峰的峰值与参考峰的时间间隔，将其换算成频率，经过参考信号标定，结果如图 8 所示。

可以看出，该系统实现的其实是一种短时傅里叶变换。但是由于观测带宽有限，只能实现瞬时带宽 483 MHz 内的频率测量，频率测量范围为双平行 MZM 可加载的信号带宽。

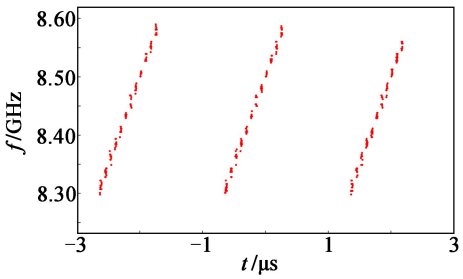



图 8　用 Matlab 对线性调频信号的频时映射进行处理结果

## 3　扩展瞬时带宽的设计

通过单个光纤环，实现的频时映射的瞬时带宽即为单个光纤环的自由光谱范围 FSR。单纯地通过缩短光程，增大单个环 FSR 的方法虽然可以获得大的瞬时带宽，但是也会降低系统的色散量 $\beta_2$。实现同样大小的分辨率，需要更大的啁啾率和更宽的啁啾带宽，还需配合更大的采样率。

文献[1]提出可以通过 $M$ 个光微环的方式，通过单独控制每个环的相位来扩大瞬时带宽。目前通过对射频信号进行数字采样，在数字上进行处理的方法，系统的瞬时带宽可以做到 6 GHz。若要达到跟数字采样相比拟的程度，频时映射的瞬时带宽也需要达到相当程度。在这里选用 10 GHz 的瞬时带宽进行下面的设计论证。该系统的分辨率除了受啁啾信号持续时长的影响外，还与光纤环透射峰的半峰宽有关系。25 MHz 已经是目前可实现的光纤环透射峰的极限。在 10 GHz 的瞬时带宽、25 MHz 分辨率的情况下，需要的环的组数、$FSR_{DD}$、相关的啁啾信号等参数如表 1 所示。

**表 1　实现 10 GHz 瞬时带宽、25 MHz 分辨率不同微环组数情况下的相关参数设计**

| 环组数 | 相隔 25 MHz 的分离时间/ps | 色散量/ps$^2$ | 啁啾信号带宽/GHz | 啁啾率/(GHz/ns) | 脉冲持续时间/ns |
|---|---|---|---|---|---|
| 20 | 5 | $3.18\times10^4$ | 200 | 5 | 40 |
| 40 | 10 | $6.36\times10^4$ | 100 | 2.5 | 40 |
| 80 | 20 | $1.27\times10^5$ | 50 | 1.25 | 40 |
| 160 | 40 | $2.54\times10^5$ | 25 | 0.625 | 40 |

从上表中可以看出，实现 10 GHz 的瞬时带宽，以及 25 MHz 的分辨率，在 20 组光微环的情况下，需要啁啾信号的带宽达到 200 GHz，这已经远远超过了目前电光调制器的工作带宽。当微环组数增加到 160 组时，啁啾信号的带宽才能降到 25 GHz。同时，相隔 25 MHz 的信号也只能分开 40 ps，后端采集的压力依然很大。FSR 为 10 GHz 的微环想要做到 25 MHz 的透射峰宽，由于片上损耗比光纤损耗

大,实现困难。同时,160 组环的相位的稳定精确控制都是需要解决的难题。当然,啁啾光源的产生除了可以通过电光调制器调制啁啾信号的方式之外,还可以通过调节激光器的谐振腔长等方式,直接产生啁啾光信号。例如:若可以产生 200 GHz,啁啾滤高啁啾率大带宽的啁啾光源会降低继承的微环数量,但是集成环数量的减少也会导致产生的色散值的减少,间隔 25 MHz 的信号,在时域上只能分开 5 ps,进一步增大了后端的采样难度。

对单个片上集成微环同时实现 10 GHz 的自由光谱范围与 25 MHz 的 3 dB 带宽进行了仿真分析。相比于 PLC 平台,SiN 与 SOI 平台的微环尺寸相对较小,但是由于波导损耗较高,在仿真软件的可计算精度内,无法基于这两个集成平台在保证 10 GHz 自由光谱范围的前提下实现 25 MHz 的带宽。表 2 是不同平台实现 10 GHz 自由光谱范围,25 MHz 带宽对应的设计参数。

**表 2 不同集成平台实现情况对比**

| 集成平台 | 损耗/(dB/cm) | 群折射率 | 10 GHz 自由光谱范围对应的周长/mm | 25 MHz 带宽对应的耦合系数 |
|---|---|---|---|---|
| PLC[15] | 0.01 | 1.45 | 21 | 0.001 5 |
| SiN[16] | 0.05 | 1.9 | 16 | 无法实现 |
| SOI[17] | 0.1 | 3.8 | 8 | 无法实现 |

尽管在 PLC 平台上可以实现单个微环同时实现 10 GHz 的自由光谱范围与 25 MHz 的 3 dB 带宽,但是为了实现窄的带宽,微环工作在欠耦合状态,drop 端的损耗高达 28 dB。图 9 为 PLC 平台 FSR 为 10 GHz,带宽为 25 MHz 的环的透射谱。

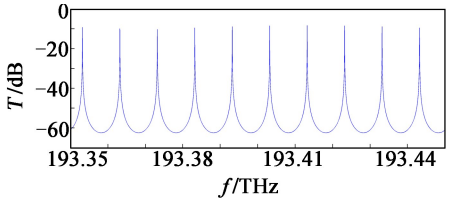



图 9 PLC 平台微环透射谱

由于晶圆本身无法保证厚度的严格均一,一般都会有几纳米的偏差,同时工艺过程也会带来偏差,使得无法在大面积区域内相同版图的结构获得相同的性能。针对同时 160 个实现带宽 25 MHz 的微环组,工艺上根本无法保证所有微环组都能正常工作,良率极低。由于带宽过窄,微环的波长很容易受外界环境影响,同时也需要保证不同组微环的中心波长相差 62.5 MHz,这就需要的微环组的两个微环上都得具有调节单元并且可以反馈控制。此外,每个微环组内需要进行相位调节,因此,160 个微环组需要 480 个调节单元,其中 320 个需要反馈控制,控制复杂,实现难度大。

## 4 结语

本文分析了光域频时映射的基本理论。利用单个光纤环充当离散色散器件,通过对线性调频信号的频时映射谱进行测量,研究了影响系统测频延时的主要因素。该系统的测频延时主要由系统所经过的光纤长度决定,实验测得该延时约为 100 ns。为了扩大系统的瞬时带宽,分析了利用级联光微环实现离散色散器件的可实现性。系统瞬时带宽的扩展还需要依赖于集成光芯片工艺的进步。

**参考文献:**

[1] 李基隆,段向阳,范 忱,等. 面向 6G 的全频段实时傅里叶变换技术研究(特邀)[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(7): 88-94.
Li Jilong, Duan Xiangyang, Fan Chen, et al. Research on full band real time Fourier transformation for 6G (Invited)[J]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 50(7): 88-94.

[2] Konatham Reddy S, Maram Reza, Cortés Luis Romero, 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.

[3] Duan Yuhua, Chen Liao, Zhou Haidong, et al. Ultrafast electrical spectrum analyzer based on all-optical Fourier transform and temporal magnification[J]. Opt. Express, 2017, 25(7): 7520-7529.

[4] 姚雨含,董建绩. 微波光子网络的可重构与智能化[J]. 半导体光电, 2022, 43(1): 31-38.
Yao Yuhan, Dong Jianji. Reconfiguration and intellectualization of microwave photonic networks [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2022, 43(1): 31-38.

[5] 王子健,都 聪,董 玮. 基于微波光子学的光再超宽带信号产生和传输技术[J]. 半导体光电, 2023, 44(1): 98-102.
Wang Zijian, Du Cong, Dong Wei. Microwave photonics-based generation and transmission technology of ultra-broadban signal over fiber[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2023, 44(1): 98-102.

[6] 戴泽璟,陈 曦,王 鹏,等. 微波光子循环移频实现大带宽高精度射频频率测量[J]. 中国电子科学研究院学报, 2023, 18(5): 455-460.
Dai Zejing, Chen Xi, Wang Peng, et al. A wideband and high resolution frequency measurement using a cyclic frequency shifting microwave photonic method[J]. J. China Academy of Electron. and Information Technol., 2023, 18(5): 455-460.

[7] Zhang Bowen, Zhu Dan, Lei Zhen. Impact of dispersion effects on temproal-convolution-based real-time Fourier transformation systems[J]. J. of Lightwave Technol., 2020,

38(17)：4664-4676.

[8] Chatellus H G D, Cortes L R, Azanz J. Optical real-time Fourier transformation with kilohertz resolutions[J]. Optica, 2016, 3(1): 2334-2536.

[9] Dai Yitang, Li Jilong, Zhang Ziping, et al. Real-time frequency-to-time mapping based on spectrally-discrete chromatic dispersion[J]. Opt. Express, 2017, 25(4): 16660-16671.

[10] Zheng Y, Li J L, Dai Y F, et al. Real-time Fourier transformation based on the bandwidth magnification of RF signals[J]. Opt. Lett., 2018, 43(2): 194-197.

[11] Yun L, Wang J. Ultra-high peak rejection notch microwave photonic filter using a single silicon microring resonator[J]. Opt. Express, 2015, 23(14): 17739-17750.

[12] 钟树菊. 有源微环谐振腔动态特性的理论研究[D]. 武汉：华中科技大学, 2009.

Zhou Shuju. The theoretical study on dynamic characteristics of the active microring resonator [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2009.

[13] 李　欣. 新型微环谐振器及其传感特性研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学, 2015.

Li Xin. Novel micro-ring resonators and sensing properties[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.

[14] 赵　磊. 集成微波光子延时和滤波技术研究[D]. 南京：南京航空航天大学, 2018.

Zhao Lei. Study on integrated microwave photonic time delay lines and filters [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018.

[15] Liu D P, Sun S Q, Yin X J, et al. Large-capacity and low-loss integrated optical buffer[J]. Opt. Express, 2018, 27(8): 11585-11593.

[16] Zhang H, Hong S H, Wang Y, et al. Ultralow-loss silicon photonics beyond the single mode regime[J]. Laser & Photonics Reviews, 2011, 16(4): 2100292.

[17] Li Z Y, Fan Z W, Zhou J J, et al. Process development of low-loss LPCVD silicon nitride waveguides on 8-inch wafer?[J]. Appl. Sciences, 2023, 13(6): 3660.

## 作者简介：

**梁会娟**(1983—)，女，博士，高级工程师，主要从事微波光子技术方面的研究。