微波光子技术及应用专题

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022012801

高速光子模数转换技术及其集成化研究进展

钱　娜，周德福，秦睿恒，化世玉，邓安逸，邹卫文*

（上海交通大学 区域光纤通信网与新型光纤通信系统国家重点实验室 智能微波光波融合创新中心，上海 200240）

摘　要： 光子模数转换技术是克服传统电子模数转换技术在采样速率、输入带宽、时钟抖动和比较器模糊等局限性的有效手段。光子模数转换技术为超宽带雷达、超高速示波器、大容量光通信等前沿应用的高速率、大带宽、高精度接收提供了有效解决方案。文章首先简要介绍了光子模数转换技术的技术途径分类及对比，然后重点介绍作者所在课题组围绕并行解复用光子模数转换系统开展的理论研究与应用研究工作。此外，分析了集成光子模数转换系统现状并展望了其未来发展思路和关键挑战。最后对全文进行了总结。

关键词： 光子模数转换技术；高速率；集成化；通道交织

中图分类号： TN957.5　**文章编号：** 1001－5868(2022)01－0061－12

Progresses in High-speed Photonic Analog-to-Digital Converter and Its Integration

QIAN Na, ZHOU Defu, QIN Ruiheng, HUA Shiyu, DENG Anyi, ZOU Weiwen

(Intelligent Microwave Lightwave Integration Innovation Center, State Key Laboratory of Advanced Optical Communication Systems and Networks, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, CHN)

Abstract: Compared with the traditional electronic analog-to-digital converter, the photonic analog-to-digital converter (PADC) has the advantage of high sampling rate, large bandwidth, low timing jitter and low comparator ambiguity. PADC provides an effective solution for high-speed, large-bandwidth, and high-resolution processing in ultra-wideband radar, ultra-high speed oscilloscope, high-capacity optical communication and so on. In this paper, different architectures of PADC are classified and compared. Then, the recent progresses of our group in channel-interleaved PADC are introduced. Besides, the status of integrated PADC are analyzed briefly and the main challenges of future integrated PADC are discussed.

Key words: photonic analog-to-digital converter; high-speed; integration; channel-interleaving

0　引言

模数转换器(ADC)作为沟通模拟世界和数字世界的桥梁，虽然仅占整个信息系统的一小部分，却直接影响着整个系统性能。模数转换器上任何的技术进步都会对信号处理水平产生巨大影响[1]。当前商用电子模数转换器采样率可达 10 GSa/s，模拟输入带宽接近 10 GHz(德州仪器，ADC12DJ5200RF)。但该性能水平仍难以满足未来应用，如宽带雷达、电子对抗、高能物理实时监控等对宽带化、高速化、精细化模数转换的需求。并且摩尔定律的放缓也意味着电子模数转换器性能已经接近极限[2]。电子模数转换器的需求与性能之间的矛盾促使人们必须寻找到一种更为可靠和高效的模数转换技术。

1　光子模数转换技术分类与简介

20 世纪 70 年代 Taylor 首次提出构想：基于光子学技术实现模数转换[3]。经过数十年的研究发展，伴随着激光器、光电探测器、光学放大器等关键器件的突破性进展，光子模数转换技术(PADC)逐

收稿日期：2022－01－28.

基金项目：国家重点研发计划项目(2019YFB2203700)；国家自然科学基金项目(61822508).

* **通信作者：**邹卫文　　**E-mail:** wzou@sjtu.edu.cn

步被证明是一种能够克服电子时钟抖动和比较器模糊等局限性的有效手段[4]。光子技术具有大带宽、高速率的天然优势，并且结合并行化架构能够与电子模数转换器有机融合实现高速高精度量化[5]。近年来，一系列的报道验证了光子模数转换技术的可行性和优越性[6-9]。

模拟信号到数字信号的过程可以分为时域离散化和幅度离散化。时域离散化可以在数学上抽象为被采样模拟信号与冲激脉冲串相乘。这一数学过程可以由高速低抖动且时域均匀分布的光脉冲在模拟域实现。幅度离散化过程则需要根据量化位数的提高引入大量且精细的物理调控方式来实现。虽然光子技术具备在多个处理域实现幅度离散化的能力，例如幅度光量化[10]、相位光量化[11]和频率光量化[12]，但是迄今为止，仍然没有一种简洁高效且高精度的光量化方案。根据光子技术在模数转换过程中的作用范围，可以将光子模数转换技术分为三大类：光采样光量化、光采样电量化、电采样光量化[13]。正如前文所述光量化在实用性方面的局限性，接下来本文主要介绍光采样电量化型模数转换技术的研究进展。虽然光采样电量化型模数转换技术实现了高速时域离散化过程，但是幅度离散化仍需利用低速电量化器件实现。因此光采样电量化型模数转换技术的核心问题就是解决高速光采样和低速电量化之间的速率匹配问题。针对这一问题，目前主要有两种技术途径：时间拉伸和均匀交织采样。

1998 年美国加州大学洛杉矶分校的 Jalali 课题组首次提出了时间拉伸光子模数转换技术[14]。其基本原理是将宽谱光脉冲经过第一段色散元件，使得其光谱分量在时域采样窗口内均匀排布。被采样信号经过电光调制加载到采样窗口上的各个光谱分量上。紧接着使用第二段色散元件再次对光脉冲进行色散展宽，使得携带信号的各个光谱分量在时域上被进一步拉伸。假设两段色散元件的色散量分别为 D_1 和 D_2，那么系统输出的光信号包络即拉伸后的信号相对于原始被采样信号在时域上展宽了 $(D_1+D_2)/D_1$ 倍，频域被压缩同等倍数。因此可以用低速电量化器件对拉伸后的信号进行幅度离散化操作，实现光子模数转换过程。通过改善系统中色散元件的色散量，Jalali 课题组已经报道了等效采样率高达 130 GSa/s[15-16]，乃至 10 TSa/s 的光子模数转换系统[17]，其基本原理见图 1。然而，利用时间拉伸原理实现高速信号的降速过程有两大天然弊病：首先是该原理实现的是开窗采样，这一问题大大限制了实际应用场景。虽然 Jalali 课题组针对这一问题提出了多通道阵列化的连续采集时间拉伸光子模数转换系统[18]。然而该方案以提升系统复杂度为代价增加采样时长，并且引入了更多模拟器件和通道不均一性。第二个问题是色散元件会降低原始信号的保真度，由此带来信号畸变。

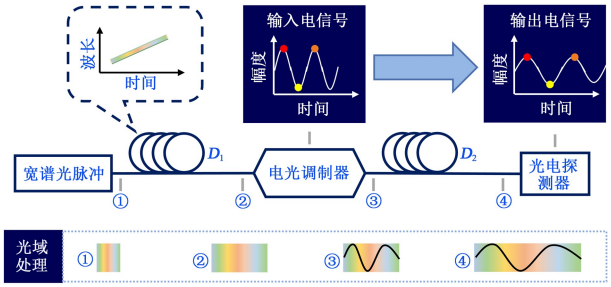


图 1 时间拉伸光子模数转换技术基本原理

均匀交织采样技术借鉴了电子模数转换器中的时间交织技术。时间波长交织型[19-22]和并行解复用型[23-24]光子模数转换系统都是基于这种原理实现的。二者的区别在于完成采样过程的高速光脉冲是基于低速光脉冲倍增获得还是基于高速光脉冲激光器直接获得。

1999 年美国海军实验室 Clark 首次提出了时间波长交织型光子模数转换系统[25-26]。该方案基于低速光脉冲通过波分复用和时域交错获得了重复频率倍增的光脉冲，如图 2 所示。2012 年美国麻省理工学院 Kärtner 课题组报道了基于时间波长交织原理实现采样率为 2.1 GSa/s 的双通道光子模数转换系统[8]。该系统实现了对 41 GHz 模拟输入信号、有效位数为 7 bits 的模数转换，这一工作是光子模数转换技术能够突破“电子瓶颈”的有力证据。

为了避免波分复用器/解复用器引入的通道间串扰，以及降低系统复杂度，Khilo 团队于 2016 年提出了一种基于多通道光子并行采样的模数转换系统[27]。该系统基于多通道光脉冲序列对等分为 N 路的模拟输入信号实现光子采样，通过控制延时差使得每个通道的光脉冲序列交错采样，实现总采样率的 N 倍提升。2020 年电子科技大学邱琪团队基于同样的方案，采用分立器件实现了 12 GSa/s 采样率、10 GHz 输入带宽的光子并行采样的模数转换系统[28]，如图 3 所示。

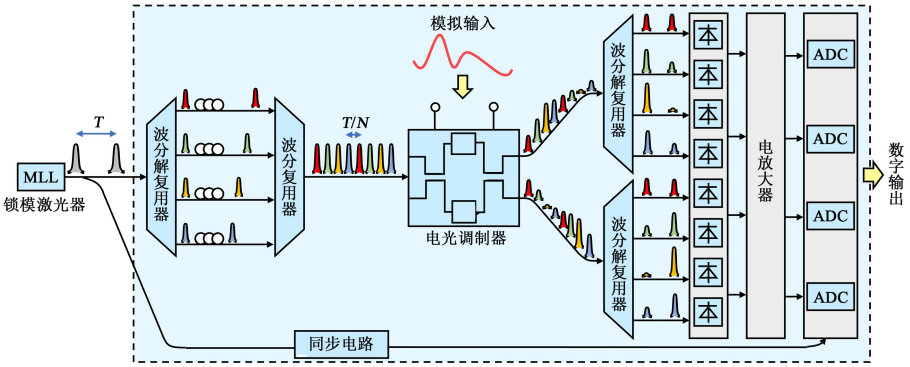


图 2　时间波长交织光子采样模数转换系统[8]

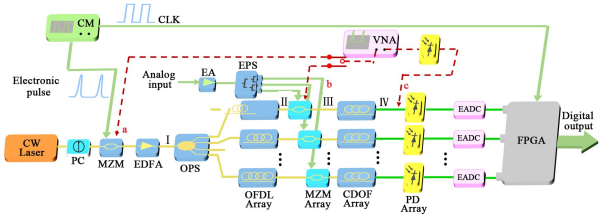


图 3　并行采样型光子模数转换系统[28]

上述两类时间波长交织型和并行采样型光子模数转换系统，均基于低速光脉冲倍增采样率的原理实现，在一定程度上利用了光子技术并行化处理的优势。但要保证倍增后的高速光子采样时钟的均匀性，则需要多个元器件精细调控，如波分复用器和延时线等。于是，另一种直接基于高速光子采样时钟采样再时域解复用的方案在 2001 年由美国林肯实验室的 Juodawlkis 博士提出[29]，如图 4 所示。因为这类方案的核心技术特点在于时域并行解复用操作，所以也被称为并行解复用光子模数转换系统[23]。这种方案完全保留了高速光脉冲的低抖动性能和均匀性，使得光子模数转换系统的性能上限高于电子模数转换器。在图 4 所示的并行解复用光子模数转换系统中，经由三级时域解复用，采样后的高速光脉冲序列重复频率降至 1/8。降速后的光脉冲序列光电转换后，可由低速电子模数转换器完成量化过程，最终实现完整的模数转换。在这种方案中高速光脉冲与各级解复用电学开关信号的同步性是技术核心之一。意大利比萨大学 Ghelfi 等于 2014 年报道的首台全光微波光子雷达中，基于并行解复用光子模数转换系统实现了宽带高精度雷达接收机[30]。这项工作实现的采样速率为 400 MSa/s，量化精度优于 7 bits@40 GHz。根据理论计算，这一水平几乎逼近时钟抖动 10 fs 对应的理论极限。2018 年 Yang 等实现了四通道总采样率 40 GSa/s 的并行解复用光子模数转换系统，有效位数在 11 和 31 GHz 输入频率下分别达到 7.7 和 7 bits[31]。此外，Yang 等还证明了并行解复用架构能够有效消除采样脉冲形状失配对光子模数转换系统频率响应的影响，实现了 35 GHz 频率范围内的平坦响应。

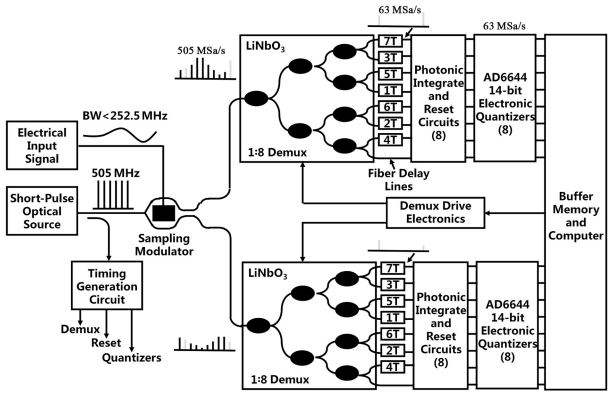


图 4　并行解复用光子模数转换系统[29]

我们对上述几类光子模数转换系统从架构原理和性能表现两方面进行了综合分析对比。根据表 1 的对比结果可以看出，并行解复用光子模数转换系统利用大带宽调制器和高重频光脉冲共同完成光子采样，一方面最大程度地提高了系统的输入带宽，另一方面光子采样脉冲的高重频和超低抖动特性则最大程度保证了采样的均匀性和高精度。并行解复用过程利用了马赫曾德尔调制器的双输出互补特性，结合正弦开关信号在时域上实现了二分抽样的光开关效果。在并行解复用光子模数转换系统中可以利用成熟的光放大技术补偿级联调制器的固有损耗，从而使该架构具备超大并行度，大幅倍增总采样率，降低后端电量化速率。

上述介绍了光子模数转换技术的技术途径分类及其性能对比，分析了并行解复用光子模数转换系统的性能优势。接下来将重点介绍本课题组在并行解复用光子模数转换系统方面已开展的系列工作。然后分析并展望集成光子模数转换系统，最后对全

文进行总结。

表 1 光子模数转换技术分类与主要性能对比

方案分类	研究机构/报道时间	采样率/(GSa·s^{-1})	输入带宽/GHz	有效位数/bits
时间拉伸	加州大学洛杉矶分校(2002)[16]	130(拉伸后)	18	7
	加州大学洛杉矶分校(2007)[17]	10^4(拉伸后)	95.3	4.5
时间波长交织	休斯顿研究实验室(2004)[32]	40	1.6	8.3
	麻省理工学院(2012)[8]	2	40	7
	上海交通大学(2016)[33]	40	12.1	7.5
并行采样	电子科技大学(2020)[28]	12	10	5.9
并行解复用	林肯实验室(2001)[29]	0.505	0.2	8.2
	比萨大学(2014)[30]	0.4	40	7
	上海交通大学(2018)[31]	40	31	7

2 并行解复用光子模数转换技术研究

并行解复用光子模数转换系统架构如图 5 所示[34]。系统基本组成单元可以分为:光子采样时钟、电光采样门、并行解复用模块、光电探测器阵列、电量化器阵列及数字信号处理模块。下面将根据这些基本组成单元的划分,依次介绍研究进展。

2.1 光子采样时钟的设计和优化技术研究

光子采样时钟是整个系统中实现信号采集和信息传递的载体,因此高性能的光子采样时钟是实现高速高精度光子模数转换系统的重要前提。另一方面,根据上文中研究现状与集成化进展的梳理,当前光子模数转换芯片均未集成光子采样时钟。这就导致整个系统仍相对庞大。反观光子采样时钟的集成化产生方案,不难发现,由于片上增益介质的缺乏,锁模激光器仍没有成熟可靠的片上解决方案。而基于级联调制器产生光学频率梳的方案,也面临着实现复杂度与脉冲光谱宽度的权衡[34]。

针对上述问题,本课题组对并行解复用光子模数转换系统展开深入研究。基于图 5 所示的系统架构,实验对比了单通道、双通道、四通道光子模数转换系统在不同光子采样时钟光谱宽度下的输入带宽。如图 6 所示。单通道系统中的光子采样时钟分别具有 3 根、7 根和 15 根光梳,相邻光梳间隔为 0.08 nm,如图 6(a)所示。双通道系统中的光子采样时钟分别具有 3 根、7 根光梳,相邻光梳间隔为 0.16 nm,如图 6(b)上图所示。四通道系统中的光子采样时钟仅具有 3 根光梳,相邻光梳间隔为 0.32 nm,如图 6(c)上图所示。经过并行解复用模块后双通道系统输出光脉冲的光梳分别增至 7 根和 15 根,如图 6(b)下图所示。四通道中输出光脉冲的光梳增至 15 根,如图 6(c)下图所示。进一步实验表征了这三个系统在具有不同光子采样时钟下的频率响应和输入带宽,结果分别如图 6(d),6(e)和 6(f)所示。在四通道系统中,如图 6(f)所示,当光子采样时钟具有 3 根梳时,四通道系统的模拟带宽超过 40 GHz。且与单通道系统在光子采样时钟具有 15 根梳时的频率响应和模拟输入带宽几乎一致,如图 6(d)所示。

研究表明系统的频率响应受到光子采样脉冲和并行解复用模块的共同影响。进一步研究发现,并行解复用模块能够在降低光子采样脉冲重复频率的同时拓宽脉冲光谱宽度,从而进一步扩大并行解复用光子模数转换系统的模拟输入带宽,有效减少对光子采样时钟中原始光梳数的需求[34],简化光子采样时钟的实现难度和复杂度。这一研究发现有利于进一步提高并行解复用光子模数转换系统的集成度。

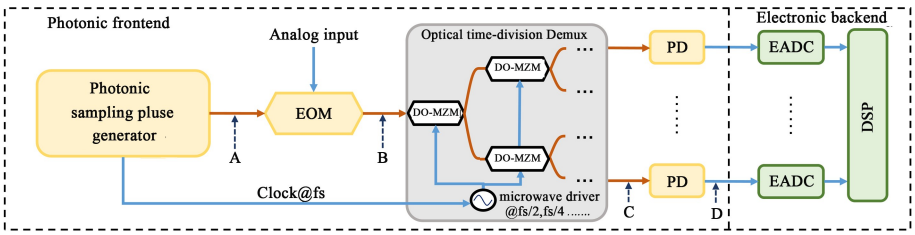


图 5 并行解复用光子模数转换系统的基本架构[34]

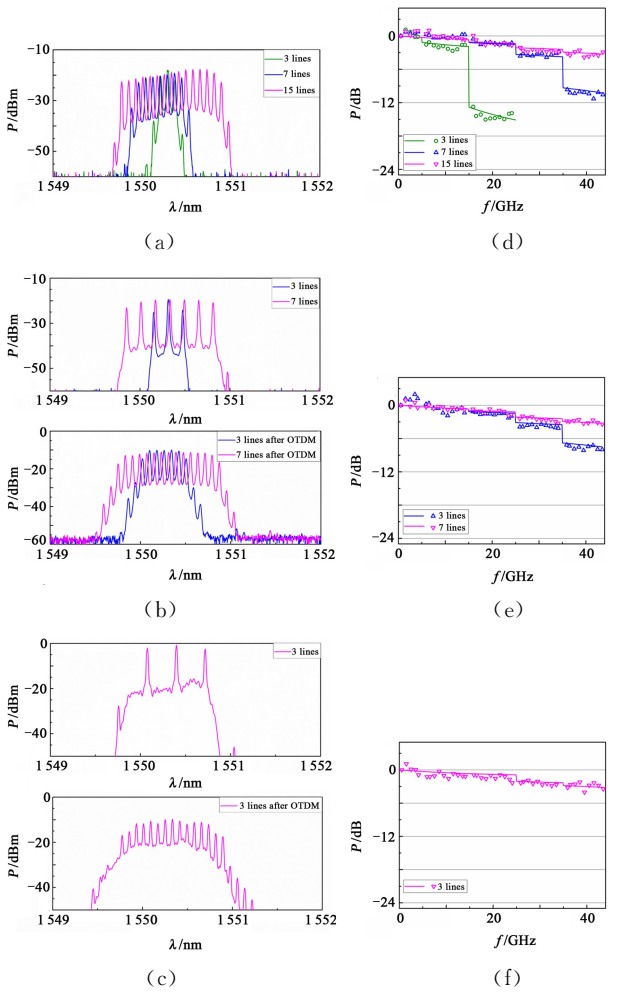


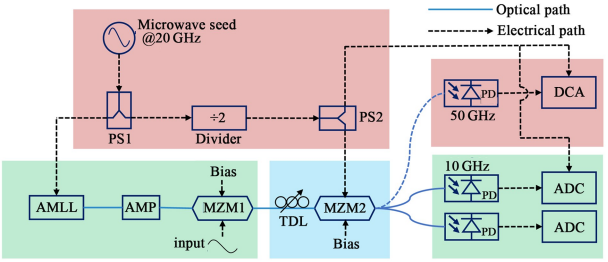
图 6　单通道(a)、双通道(b)、四通道(c)系统中光子采样时钟光谱图与解复用后输出光脉冲光谱图；单通道(d)、双通道(e)、四通道(f)系统在不同光子采样时钟下的频率响应测试结果图[34]

2.2　并行解复用模块设计与优化技术研究

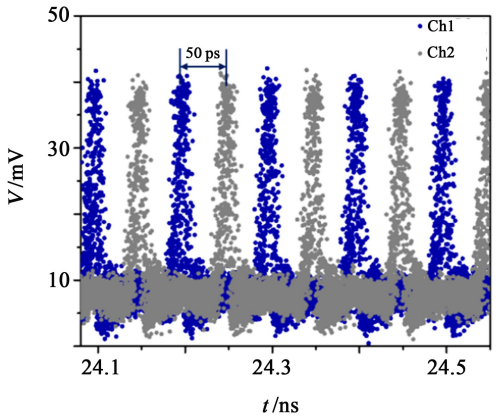
在并行解复用光子模数转换系统中并行解复用模块通过级联双输出调制器以及电学开关信号实现对高速光子采样脉冲序列的逐级降速。因此并行解复用模块是实现高速光子采样与低速电量化之间速率匹配的关键模块。该模块中单个双输出调制器的功能等价于一个光开关。单个光开关的性能会直接影响相邻脉冲信号序列解复用输出的抑制比，进而影响整个光子模数转换系统的频率响应和有效带宽。此外，并行解复用模块采用的双输出调制器存在偏置点漂移等稳定性缺陷，该缺陷会导致调制器输出两臂的幅度偏差，进一步产生幅度失配，恶化模数转换精度。

针对上述问题，本课题组对并行解复用模块的工作原理和优化技术进行了多方面的研究。首先，针对如图 7(a)所示的两通道光子模数转换系统，研究单个双输出调制器的时域解复用特性。图 7(a)中光子采样时钟由主动锁模激光器产生，加载在双输出调制器上的射频驱动信号的频率为光子采样时钟重复频率的一半。可调延时线用于控制射频驱动信号与光子采样时钟的相位差。研究发现要使得相邻脉冲信号序列解复用输出的抑制比最高，需同时满足三个条件，即双输出调制器工作在正交偏置点；射频驱动信号幅度为双输出调制器半波电压值的一半；射频驱动信号与光子采样时钟的相位差为零[35]。当满足这三个条件时，可以使得相邻脉冲信号序列以高抑制比从调制器双臂间隔输出，从而达到对信号序列降速的效果。实验结果如图 7(b)所示，原本重复周期为 50 ps 的光脉冲序列被解复用为两通道光脉冲，每个通道光脉冲序列重复周期为 100 ps。在此基础上，实现了总采样率 20 GSa/s 的光子模数转换系统。当输入信号频率为 11 和 31 GHz 时系统的有效位数分别为 6.9 和 6.1 bits[35]。

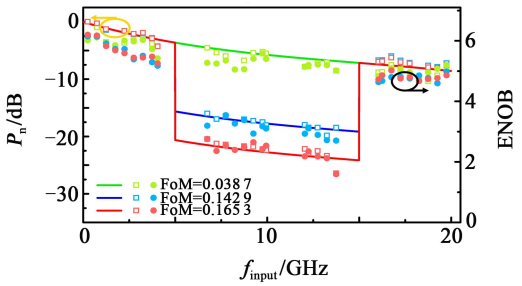
进一步研究发现，影响并行解复用模块解复用性能的三个条件，即双输出调制器的偏置点、射频驱动信号的幅值以及射频驱动信号与光子采样时钟的相位差，它们会共同影响整个光子模数转换系统的频域响应。根据这一理论发现，提出了量化评估并行解复用模块解复用性能的品质因数(FoM)[36]。



(a)　两通道光子模数转换系统[35]



(b)　双通道解复用后的时域脉冲[35]



（c） 双通道系统在不同解复用状态下的频率响应[36]

图 7 两通道光子数模转换系统构成及其解复用特性

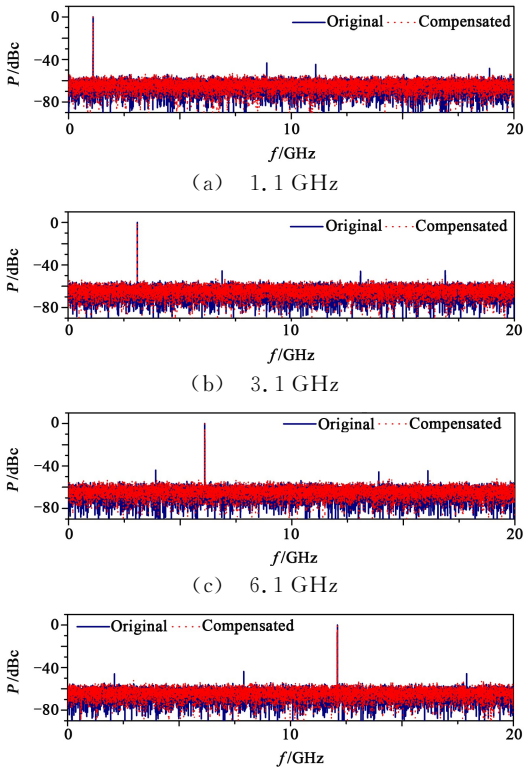
进而提出了根据 FoM 和系统频率响应来调控并行解复用模块性能。如图7(c)所示，在两通道光子模数转换系统中能够通过最小化 FoM 值和优化系统频率响应平坦度实现接近于理想状态的解复用效果。该方法能够大大降低集成光子模数转换系统中片上并行解复用模块的测试难度和复杂度。

紧接着本课题组提出了一种双输出调制器偏置点自动锁定的方法[37]。通过调制器两臂输出光功率的自动比较反馈调节调制器偏置点，使其工作在正交偏置点下，提升了并行解复用光子模数转换系统的长时工作稳定性。

2.3 通道失配产生原理与抑制技术研究

由于单通道光子模数转换系统在速率和带宽方面受限，目前光子模数转换系统多采用通道交织技术实现高频段信号的奈奎斯特采样。然而，无论是传统电子模数转换技术还是光子模数转换技术都无法避免通道间不均一性导致的通道失配[38]。而通道失配会使得数字域重构得到的信号失真，恶化模数转换性能。因此，需要对光子模数转换系统中通道失配产生原理和相应的抑制技术进行研究。

针对上述问题，本课题组首先研究并分析了多通道光子模数转换系统中的幅度失配与延时失配。基于频域分析方法推导和计算了系统中由于幅度失配和延时失配引入的杂散位置及其影响[33]。提出了基于频谱分析的通道失配标定和补偿算法，从而在硬件补偿的基础上进一步消除了通道失配引入的杂散，将系统数字量化精度提升至由幅度噪声和时间抖动决定的理论极限。通道失配补偿算法效果对比如图 8 所示。图 8(a)～(d)分别给出了模拟输入频率为 1.1，3.1，6.1 和 12.1 GHz 时的数字量化结果频谱及其在进行通道失配补偿前后对比。从图中可以看出，进行通道补偿之后，通道失配效应引入的失配杂散得到了有效消除。以 3.1 GHz 模拟输入为例，在通道补偿后，数字量化频谱的信纳比从 39 dB 上升至 54 dB，其对应的有效比特位数由 6.2 位上升至 8.7 位。



（a） 1.1 GHz

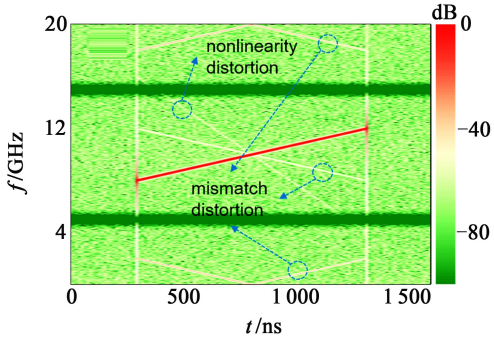
（b） 3.1 GHz

（c） 6.1 GHz

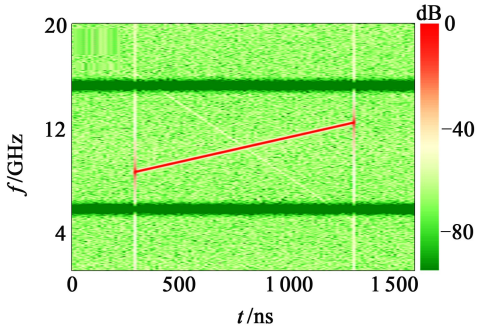
（d） 12.1 GHz[33]

图 8 不同输入频率下的通道失配补偿前后的数字量化频谱

为了进一步研究光子模数转换系统在宽带模拟输入下的性能表现，从而验证其在雷达等系统中的潜在应用价值，我们对宽带信号下光子模数转换系统的通道失配也进行了研究与抑制。提出了一种适用于宽带调频信号的通道失配补偿算法，该算法通过短时傅里叶变换提取各个通道中的延时与幅度参数从而进行有效补偿[39]。图 9 给出了宽带调频信号通道失配补偿前后的对比，可以看出，当通道失配效应被补偿和校正之后，瞬时频率所对应的失配杂散均被有效抑制。



（a） 通道失配补偿之前



（b）　通道失配补偿之后[39]

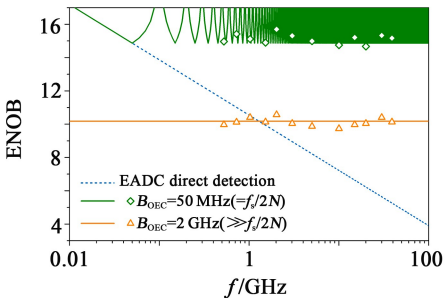
图 9　宽带调频信号的短时傅里叶变换频谱

2.4　光子模数转换系统中的时间抖动及其优化

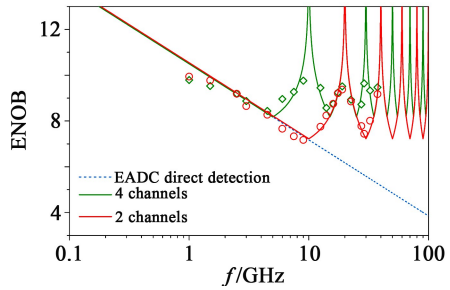
在通道失配等杂散被抑制和消除之后，光子模数转换系统的数字量化精度极限取决于其噪声水平。噪声可以分为幅度噪声与相位噪声。其中相位噪声主要由光子采样时钟与模拟输入信号之间的相对时间抖动以及光子模数转换系统中电子后端在数字量化时额外引入的时间抖动决定。

针对光子采样时钟与模拟输入信号之间相对时间抖动引入的噪声，本课题组采用相参锁定技术提出了基于采样门的微波光子锁相环[40]。通过提取输入信号与光子采样时钟之间的相位误差并将误差反馈至光子采样时钟的调谐端，实现外部射频信号与光子采样时钟之间的相参锁定。相比于自由振荡信号源 20 fs 左右的时钟抖动，经过微波光子锁相环后，外部射频信号与光子采样时钟之间的残余时间抖动压缩至 1.5 fs。这一技术突破能够进一步提升光子模数转换系统的有效位数极限。

对于后端电子孔径抖动，由于解复用模块的降速作用，最终输入后端电子模数转换器的信号频率并非为输入光子模数转换系统的模拟信号频率。因此电子模数转换器可以在较高频率的模拟输入下实现相当于低频处的数字量化精度[41]。在高频输入下对后端的电子孔径抖动带来的抖动噪声具有抑制和优化作用。根据该理论分析，探究了在不同的光电转换带宽和解复用通道数下电子孔径抖动对有效位数（ENOB）的影响。如图 10(a)所示，当光电转换带宽等于单通道奈奎斯特频率时，能够对电子孔径抖动起到最佳优化效果。另一方面，优化作用随着并行解复用通道数增加而提高，如图 10(b)所示。



（a）　不同光电转换带宽下的有效位数对比



（b）　不同解复用通道数下的有效位数对比[41]

图 10　不同光电转换带宽和解复用通道数下的有效位数

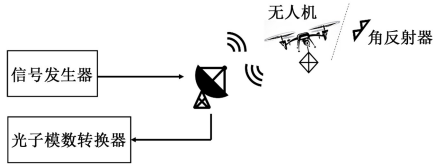
2.5　光子模数转换技术的应用研究

微波光子雷达具有超大带宽、跨频段可重构的性能特点[30,42-43]，而光子模数转换技术的超宽带、低抖动等优势可以实现对雷达回波信号的直接数字化采集。相较于传统雷达接收机通过射频前端下变频再进行模数转换的处理方式，微波光子雷达更为简便并且具备多波段处理能力。

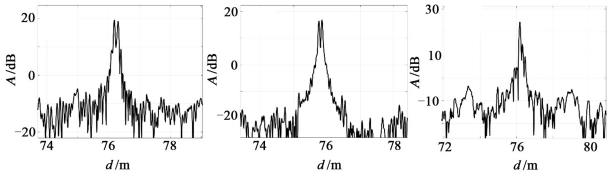
为了使光子模数转换技术更好地应用于宽带雷达数字化接收，我们首先引入人工智能赋能技术，校正了电光调制器引入的非线性，补偿了通道间的延时失配[44]，增加了光子模数转换系统的无杂散动态范围。在点频信号失配校正研究的基础上，进一步开展了具有泛化能力的宽带信号延时失配校正研究，将失配引起的杂散降至系统噪底水平，使得针对光子模数转换系统的人工智能赋能技术更具鲁棒性和实际应用价值[45-46]。

光子模数转换技术为宽带高分辨雷达的数字化接收提供了新的可靠途径，本课题组基于光子模数转换技术开展了宽带雷达目标探测性能研究。宽带雷达收发实验装置示意图如图 11(a)所示[47]。利用微波光子技术产生带宽为 4 GHz 的线性调频信号，起始频率分别设置为 8 和 33 GHz，即该宽带雷达分别工作在 X 波段和 Ka 波段，由光子模数转换系统实现对宽带雷达回波信号的射频直采。实验结果表明 X 波段和 Ka 波段下 4 GHz 瞬时带宽的信号被有效接收。经过通道失配补偿和脉冲压缩后得到了探测目标（角反射器和无人机）的一维成像结果，如图 11(b)～(d)所示。计算一维成像图中每个峰值幅度

降低 3 dB 的点数，可以得到该宽带雷达在 X 波段和 Ka 波段下的分辨率分别为 4.1 和 4.28 cm，与理论分辨率(3.75 cm)较为接近。



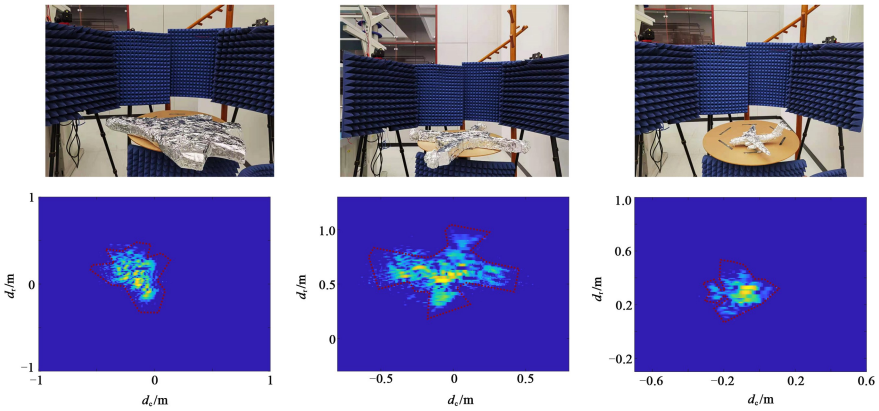
(a) 宽带雷达收发实验装置示意图



(b) X 波段(角反射器) (c) Ka 波段(角反射器) (d) X 波段(无人机)

图 11 宽带雷达收发实验装置及其一维成像结果[47]

考虑到实际应用场景中需要获得多维信息来提取更多目标特征，因此本课题组还开展了宽带雷达系统成像实验研究。宽带逆合成孔径雷达(ISAR)实验装置与图 11(a)类似。在雷达发射端，基带信号由任意波形发生器产生，载频信号由微波本振源产生，通过混频得到 32～40 GHz 的线性调频信号，在接收端由光子模数转换系统进行射频直采。通过多段脉冲的连续采集以及成像算法处理得到了多类复杂目标的二维成像结果，如图 12 所示。根据 ISAR 分辨率的计算公式可得理论分辨率为 3.14 cm×1.875 cm，通过对两个点目标进行实测得到实际分辨率为 3.3 cm×1.9 cm，该值与理论分辨率十分吻合。



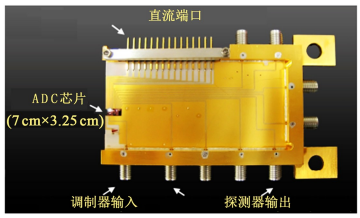
(a) 固定翼飞机模型 (b) 四轴无人机模型 (c) 运 20 模型

图 12 不同目标模型及二维成像结果

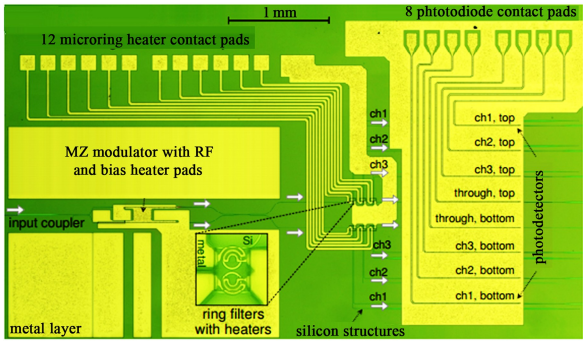
3 集成光子模数转换技术进展与挑战

下一代雷达与移动通信系统朝着高频、大带宽方向发展的同时，也在规模化、阵列化等方面对信号接收与处理单元提出了更高的要求。国内外研究者们已利用分立的光电子器件从原理上证实了光子模数转换技术能够有效提升模数转换器的采样速率、模拟带宽和精度。然而，基于分立器件的光子模数转换系统存在体积大、功耗高、受外界环境影响较为严重、一致性和可靠性低等问题，并且只能初步应用于雷达等系统的原理验证上，很难真正大范围地应用于实际系统和场景下。因此，要把光子模数转换技术推向实际应用，迫切需要实现集成光子模数转换系统，以降低系统尺寸、功耗和研制成本，增强实用化能力。

2012 年 Kärtner 课题组基于图 2 所示的系统架构，率先开展了光子模数转换系统的片上集成化研



(a) 芯片封装实物图

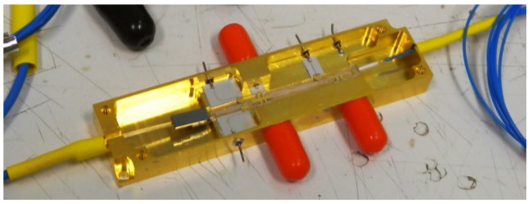


(b) 内部硅基光子芯片设计版图

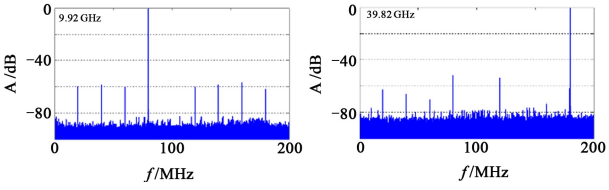
图 13 时间交织型光子模数转换芯片封装实物照片及内部版图

究，以期将这项技术小型化，提高其鲁棒性，并且挖掘其低成本批量生产的潜力。如图 13 所示[8]，这项工作采用硅基光电子技术，除锁模激光器外，其余光电子器件均在同一芯片上实现。该光子模数转换芯片总采样率的实测值为 2.1 GSa/s，输入 10 GHz 正弦信号下的有效位数为 3.5 bits[8]。

2013 年 Ghelfi 等基于铌酸锂集成技术集成了并行解复用光子模数转换系统中的并行解复用模块，进一步将系统小型化，降低了解复用开关信号功率，提高了稳定性[23]。图 14(a)是封装后铌酸锂并行解复用模块照片，图 14(b)是基于该模块在 9.92 和 39.82 GHz 输入频率下实现的转换精度。



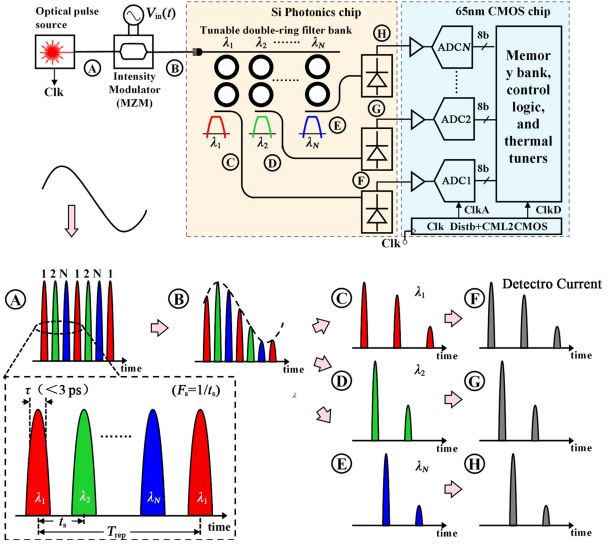
(a)　模块照片



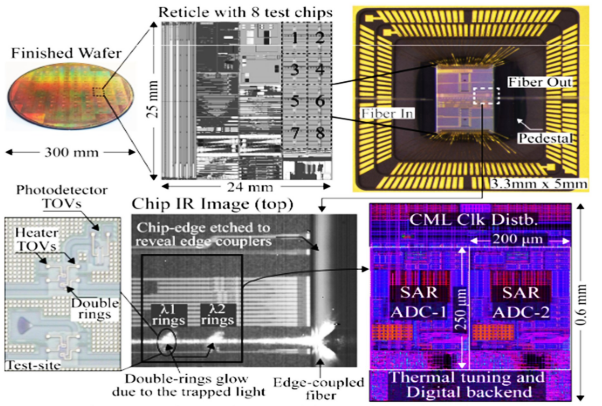
(b)　9.92 和 39.82 GHz 输入频率下的量化频谱[23]

图 14　铌酸锂并行解复用模块照片及量化频谱

2020 年 Mehta 等在图 2 所示系统架构的基础上进行了简化，实现了一款光学采样 ADC 芯片[48]。该芯片省去了时间交错的步骤，直接通过波分复用



(a)　光学采样 ADC 芯片的设计架构



(b)　封装的测试芯片及其裸片照片

图 15　ADC 芯片架构设计及封装测试芯片照片[27]

对高速光脉冲进行降速，如图 15(a)所示。该款芯片基于两通道和片外 40 GHz 带宽调制器的配置实现了总采样率为 4 GSa/s、输入信号频率范围为 2 MHz～45 GHz 的性能指标。有效位数最高可达 6.3 bits。除此之外，这项工作基于晶圆级三维异构集成平台实现了微电子器件与光电子器件的异质集成，有利于发挥光电子器件大带宽的优势并且能够降低后续系统级封装难度，如图 15(b)所示。

2021 年本课题组与北京大学、浙江大学、中国科学院半导体研究所等单位合作，基于并行解复用架构结合硅基光电子集成技术，实现了一款高速光子模数转换系统芯片，如图 16 所示。该芯片集成了采样门调制器和光电并行解复用模块。这两个模块是光子模数转换系统中的核心模块，也是系统能够同时具备高速采样和高精度量化能力的关键所在。经过各个模块调控，表征得到该款芯片总采样率为 40 GSa/s，输入带宽为 18 GHz。考虑到集成光子模数转换系统在信噪比和有效位数方面与分立系统还存在明显差距。因此本课题组已与浙江大学合作研制基于薄膜铌酸锂技术的集成光子模数转换系统，以期进一步降低片上系统损耗，提升信噪比和有效位数。

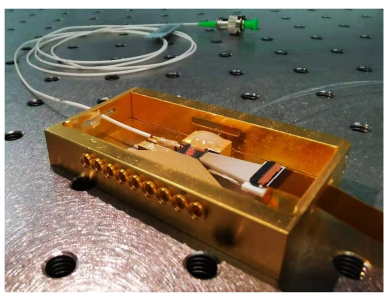


图 16　本课题组研制的集成光子模数转换系统实物

表 2 列出了本文中所提及的具有代表性的集成光子模数转换系统的研究结果，并对其性能进行了比较。可以看出，当前系统集成度普遍不高，且模数转换的综合性能与传统分立系统相比仍存在较大差距。因此，未来光子模数转换技术需要真正解决系统化集成难题，并且在降低系统尺寸、功耗的同时保证其工作性能，实现对电子模数转换技术的综合性超越。接下来本文将从单元器件和集成手段两方面展望未来集成光子模数转换系统的发展。

表 2 集成光子模数转换系统的性能对比

研究机构	架构类型	片上集成的器件	采样率/(GSa/s)	输入带宽/GHz
麻省理工学院[8]	时间波长交织	波分解复用器＋采样门调制器＋探测器	2.1	12
比萨大学[23]	并行解复用	解复用调制器	0.4	40
加州大学伯克利分校[48]	波分解复用	波分解复用器＋探测器＋EADC	4	45
上海交通大学	并行解复用	采样门调制器＋可调延时线＋解复用调制器	40	18

目前主流的光子模数转换系统架构普遍包含的集成光电子单元器件有：调制器、波分复用器、可调延时线、光电探测器等。在调制器方面，研究者们近年来开发了薄膜铌酸锂工艺，基于低损耗、高电光系数的铌酸锂材料研发出超宽带、低半波电压的薄膜铌酸锂调制器，带宽超 100 GHz，$V_{\pi}L$ 小于 2 V·cm[49]。还有研究者采用聚合物材料研制了带宽超 500 GHz 的电光调制器[50]。在可调延时线方面，研究者们致力于降低波导损耗、提升延时范围、提高调节精度。目前已有报道损耗为 0.28 dB/cm、总延时量为 5.12 ns、调节精度为 10 ps 的硅基可调延时线[51]。在光电探测器方面，光子模数转换系统对于探测器灵敏度要求较高。目前已有报道灵敏度达－40 dBm 的光电探测器。

在集成手段方面，研究者们将探索是否采用多材料体系，即单片同质集成或异质集成。在单片同质集成方面，最为成熟的是硅基材料，以往报道的集成光子模数转换系统也大多采用硅基集成技术。这是考虑到硅基集成技术兼容性高，且能够开发多类光电子器件[52]。与此同时，也有研究者提出了基于磷化铟材料的单片同质集成方法[53]。相比之下，异质集成能够更大程度地发挥各种材料的优势，提升系统综合性能，但在材料兼容、先进工艺、系统测试、散热等方面难度更高。目前已有研究者相继利用光子引线键合技术[54]、晶圆键合技术[55]、硅通孔技术[56]进行光电互联来实现光电混合异质集成[57]。

在集成光电子单元器件性能水平以及集成手段与工艺两方面的不断精进下，可以预见的是光子模数转换器的性能将综合性提升，形态将逐步成熟，功能将更加实用化。

4 总结

综上所述，本文从光子模数转换系统的技术实现途径出发，简要介绍并对比了目前主流的光子模数转换系统方案。详细介绍了本课题组围绕并行解复用光子模数转换系统开展的理论研究与应用研究工作。阐述了光子模数转换系统小型化与规模化的必然趋势，总结了国内外集成光子模数转换系统的研究成果。针对当前系统化集成存在的普遍挑战，提出了下一步发展思路。未来研究人员在研发高性能、高集成度光子模数转换器的同时，还会关注光子模数转换器如何在超宽带信号与信息处理场景下发挥重要作用。

参考文献：

[1] Schneider T, Berekovic M. High-Bandwidth, Analogue-to-Digital Conversion for THz Communication Systems[M]. THz Communications. Springer, Cham, 2022: 331-340.

[2] Jonsson B E. A/D-converter performance evolution[R]. Converter Passion, 2012.

[3] Taylor H. An optical analog-to-digital converter-design and analysis[J]. IEEE J. of Quantum Electron., 1979, 15(4): 210-216.

[4] Valley G C, Hurrell J P, Sefler G A. Photonic analog-to-digital converters: fundamental and practical limits[J]. International Society for Optics and Photonics, 2004, 5618: 96-106.

[5] Bell J A, Hamilton M C, Leep D A, et al. Extension of electronic A/D converters to multi-gigahertz sampling rates using optical sampling and demultiplexing techniques[C]// Twenty-Third Asilomar Conf. on Signals, Systems and Computers, 1989: 289-290.

[6] Fok M P, Lee K L, Shu C. 4/spl times/2.5 GHz repetitive photonic sampler for high-speed analog-to-digital signal conversion[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2004, 16(3): 876-878.

[7] Kim J, Park M J, Perrott M H, et al. Photonic subsampling analog-to-digital conversion of microwave signals at 40-GHz with higher than 7-ENOB resolution[J]. Opt. Express, 2008,

16(21)：16509-16515.

[8] Khilo A，Spector S J，Grein M E，et al. Photonic ADC：overcoming the bottleneck of electronic jitter[J]. Opt. Express，2012，20(4)：4454-4469.

[9] Misra A，Kress C，Singh K，et al. Integrated source-free all optical sampling with a sampling rate of up to three times the RF bandwidth of silicon photonic MZM[J]. Opt. Express，2019，27(21)：29972-29984.

[10] Jalali B，Xie Y M. Optical folding-flash analog-to-digital converter with analog encoding[J]. Opt. Lett.，1995，20(18)：1901-1903.

[11] Jarrahi M，Pease R F W，Lee T H. Spatial quantized analog-to-digital conversion based on optical beam-steering[J]. J. of Lightwave Technol.，2008，26(14)：2219-2226.

[12] Xu C，Liu X. Photonic analog-to-digital converter using soliton self-frequency shift and interleaving spectral filters[J]. Opt. Lett.，2003，28(12)：986-988.

[13] Valley G C. Photonic analog-to-digital converters[J]. Opt. Express，2007，15(5)：1955-1982.

[14] Jalali B，Bhushan A S，Coppinger F. Photonic time-stretch：A potential solution for ultrafast A/D conversion[C]// IEEE Inter. Topical Meeting on Microwave Photonics. Technical Digest (Including High Speed Photonics Components Workshop)，1998：197-198.

[15] Bhushan A S，Coppinger F，Jalali B，et al. 150 Gsample/s wavelength division sampler with time-stretched output[J]. Electron. Lett.，1998，34(5)：474-475.

[16] Bhushan A S，Kelkar P V，Jalali B，et al. 130-GSa/s photonic analog-to-digital converter with time stretch preprocessor[J]. IEEE Photon. Technol. Lett.，2002，14(5)：684-686.

[17] Chou J，Boyraz O，Solli D，et al. Femtosecond real-time single-shot digitizer[J]. Appl. Phys. Lett.，2007，91(16)：161105.

[18] Han Y，Jalali B. Continuous-time time-stretched analog-to-digital converter array implemented using virtual time gating[J]. IEEE Trans. on Circuits and Systems Ⅰ：Regular Papers，2005，52(8)：1502-1507.

[19] Yariv A，Koumans R. Time interleaved optical sampling for ultra-high speed A/D conversion[J]. Electron. Lett.，1998，34(21)：2012-2013.

[20] Kang J U，Esman R D. Demonstration of time interleaved photonic four-channel WDM sampler for hybrid analogue-digital converter[J]. Electron. Lett.，1999，35(1)：60-61.

[21] Lee K L，Shu C，Liu H F. 10 Gsample/s photonic analog-to-digital converter constructed using 10-wavelength jitter-suppressed sampling pulses from a self-seeded laser diode[C]// IEEE Conf. on Lasers and Electro-Optics，2001：67-68.

[22] Fu X，Zhang H，Peng Y，et al. 40-Gbps time-and wavelength-interleaved pulse-train generation in wavelength-demultiplexing analog-to-digital conversion[J]. Optical Engin.，2009，48(10)：104302.

[23] Pierno L，Fiorello A M，Bogoni A，et al. Optical switching matrix as time domain demultiplexer in photonic ADC[C]// 2013 European Microwave Integrated Circuit Conf. IEEE，2013：41-44.

[24] Scotti F，Laghezza F，Pinna S，et al. High precision photonic ADC with four time-domain-demultiplexed interleaved channels[C]// Optoelectronics and Communications Conf. Hold Jointly with International Conf. on Photonics in Switching，IEEE，2013：TuO1_3.

[25] Clark T R，Kang J U，Esman R D. Performance of a time-and wavelength-interleaved photonic sampler for analog-digital conversion[J]. IEEE Photon. Technol. Lett.，1999，11(9)：1168-1170.

[26] Clark T R，Matthews P J，Currie M. Real-time photonic analog-digital converter based on discrete wavelength-time mapping[C]// IEEE Inter. Topical Meeting on Microwave Photonics，1999：231-234.

[27] Gevorgyan H，Khilo A. Simplified architecture for photonic analog-to-digital conversion，utilizing an array of optical modulators[C]// Silicon Photonics Ⅺ. Inter. Society for Optics and Photonics，2016，9752：97520I.

[28] Zhang T，Su J，Fan Z，et al. Experimental demonstration of a real-time hybrid optoelectronic analog-to-digital converter[J]. Optical Engin.，2020，57(5)：057105.

[29] Juodawlkis P W，Twichell J C，Betts G E，et al. Optically sampled analog-to-digital converters[J]. IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques，2001，47(10)：1840-1853.

[30] Ghelfi P，Laghezza F，Scotti F，et al. A fully photonics-based coherent radar system[J]. Nature，2014，507(7492)：341-345.

[31] Yang G，Zou W，Yu L，et al. Influence of the sampling clock pulse shape mismatch on channel-interleaved photonic analog-to-digital conversion[J]. Opt. Lett.，2018，43(15)：3530-3533.

[32] Ng W W，Luh L，Persechini D L，et al. Ultrahigh-speed photonic analog-to-digital conversion technologies[C]// Enabling Photonic Technologies for Aerospace Applications Ⅵ. Inter. Society for Optics and Photonics，2004，5435：171-177.

[33] Yang G，Zou W，Yu L，et al. Compensation of multi-channel mismatches in high-speed high-resolution photonic analog-to-digital converter[J]. Opt. Express，2016，24(21)：24061-24074.

[34] Qian N，Zhang L，Chen J，et al. Characterization of the frequency response of channel-interleaved photonic ADCs based on the optical time-division demultiplexer[J]. IEEE Photonics J.，2021，13(5)：1-9.

[35] Yu L，Zou W，Yang G，et al. Switching response of dual-

output Mach-Zehnder modulator in channel-interleaved photonic analog-to-digital converter [J]. Chinese Optics Lett., 2018, 16(12): 120602.

[36] Qian N, Yu L, Chen J, et al. Influence of the demultiplexer on channel-interleaved photonic analog-to-digital converters [J]. IEEE Photonics J., 2020, 12(5): 1-10.

[37] Zheng K, Zou W, Yu L, et al. Stability optimization of channel-interleaved photonic analog-to-digital converter by extracting of dual-output photonic demultiplexing [J]. Chinese Optics Lett., 2020, 18(1): 012502.

[38] Kurosawa N, Kobayashi H, Maruyama K, et al. Explicit analysis of channel mismatch effects in time-interleaved ADC systems[J]. IEEE Trans. on Circuits and Systems Ⅰ: Fundamental Theory and Applications, 2001, 48(3): 261-271.

[39] Yang G, Zou W, Yuan Y, et al. Wideband signal detection based on high-speed photonic analog-to-digital converter[J]. Chinese Optics Lett., 2018, 16(3): 030601.

[40] Yang G, Zou W, Chen J. High-resolution characterization of parametric sampling based photonic phase locking [C]// IEEE 2017 Inter. Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP), 2017: 1-4.

[41] Yang G, Zou W, Yu L, et al. Investigation of electronic aperture jitter effect in channel-interleaved photonic analog-to-digital converter[J]. Opt. Express, 2019, 27(6): 9205-9214.

[42] Zou W, Zhang H, Long X, et al. All-optical central-frequency-programmable and bandwidth-tailorable radar[J]. Scientific Reports, 2016, 6(1): 1-8.

[43] Qian N, Zou W, Zhang S, et al. Signal-to-noise ratio improvement of photonic time-stretch coherent radar enabling high-sensitivity ultrabroad W-band operation [J]. Opt. Lett., 2018, 43(23): 5869-5872.

[44] Xu S, Zou X, Ma B, et al. Deep-learning-powered photonic analog-to-digital conversion [J]. Light: Science & Applications, 2019, 8(1): 1-11.

[45] Zou X, Xu S, Deng A, et al. Photonic analog-to-digital converter powered by a generalized and robust convolutional recurrent autoencoder[J]. Opt. Express, 2020, 28(26): 39618-39628.

[46] Zou X, Xu S, Zou W. Visualizing and simplifying convolutional recurrent autoencoder for mismatch compensation of channel-interleaved photonic analog-to-digital converter[J]. Opt. Lett., 2021, 46(13): 3167-3170.

[47] 李成功, 钱 娜, 邓安逸, 等. 面向宽带雷达直接接收的光子模数转换系统中的通道失配补偿[J]. 光学学报, 2020, 40(16): 30-36.

Li Chenggong, Qian Na, Deng Anyi, et al. Channel-mismatch compensation of photonic analog-to-digital converter for wideband radar direct receiving[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(16): 30-36.

[48] Mehta N, Su Z, Timurdogan E, et al. An optically sampled ADC in 3D integrated silicon-photonics/65 nm CMOS[C]// 2020 IEEE Symp. on VLSI Technol., 2020: 1-2.

[49] Mercante A J, Yao P, Shi S, et al. 110 GHz CMOS compatible thin film $LiNbO_3$ modulator on silicon[J]. Opt. Express, 2016, 24(14): 15590-15595.

[50] Burla M, Hoessbacher C, Heni W, et al. 500 GHz plasmonic Mach-Zehnder modulator enabling sub-THz microwave photonics[J]. APL Photonics, 2019, 4(5): 56106.

[51] Hong S, Zhang L, Wang Y, et al. Ultralow-loss compact silicon photonic waveguide spirals and delay lines [J]. Photonics Research, 2022, 10(1): 1-7.

[52] Atabaki A H, Moazeni S, Pavanello F, et al. Integrating photonics with silicon nanoelectronics for the next generation of systems on a chip[J]. Nature, 2018, 556(7701): 349-354.

[53] Fandiño J S, Muñoz P, Doménech D, et al. A monolithic integrated photonic microwave filter[J]. Nature Photonics, 2017, 11(2): 124-129.

[54] Lindenmann N, Balthasar G, Hillerkuss D, et al. Photonic wire bonding: a novel concept for chip-scale interconnects [J]. Opt. Express, 2012, 20(16): 17667-17677.

[55] Weigel P O, Savanier M, DeRose C T, et al. Lightwave circuits in lithium niobate through hybrid waveguides with silicon photonics[J]. Scientific Reports, 2016, 6(1): 1-9.

[56] Behroozpour B, Sandborn P A M, Quack N, et al. 11.8 chip-scale electro-optical 3D FMCW lidar with 8 μm ranging precision[C]//2016 IEEE Inter. Solid-State Circuits Conf. (ISSCC), 2016: 214-216.

[57] 邹卫文, 马伯文, 徐绍夫. 智能光子处理系统:概念与研究进展[J]. 中兴通讯技术, 2020, 26(2): 1-10.

Zou Weiwen, Ma Bowen, Xu Shaofu. Intelligent photonic processing system: concept and research progress[J]. ZTE Technology J., 2020, 26(2): 1-10.

作者简介:

钱 娜(1994—),女,安徽省池州市人,博士,助理研究员,主要研究方向为宽带微波光子信号处理、光电融合集成化;

邹卫文(1980—),男,博士,教授,博士生导师,国家"优青"获得者,军委科技委重点项目首席科学家,重点研发项目负责人;主要从事智能微波光波融合技术研究;在国际主流期刊发表 SCI 论文 100 余篇。