Kerr孤子微梳实现超宽带（320 GHz）光子-电子模数转换器

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：https://www.iikx.com/news/progress/36393.html

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

Kerr孤子微梳实现超宽带（320 GHz）光子-电子模数转换器。 导读

来自德国卡尔斯鲁厄理工学院 (KIT)的研究团队联合瑞士洛桑联邦理工学院 (EPFL) 等国际团队近期在LSA上发表了一项颠覆性研究，首次将Kerr孤子微梳引入光子-电子ADC系统，成功实现320 GHz的采样带宽与至少640 GSa/s有效采样率，创下ADC领域带宽纪录。通过结合依赖于超宽带宽薄膜铌酸锂调制器的前端电光转换与基于氮化硅片上Kerr微梳光源的并行相干探测，该系统在第一奈奎斯特区一次性捕获了中心波长24.4 GHz至264.4 GHz的混合调制信号，误码率（BER）均低于10-5。这一突破不仅解决了传统电子ADC的带宽瓶颈和光子ADC的集成困难与采样率受限问题，更通过全系统一次性校准与频谱相干拼接算法，为6G通信、太赫兹雷达及高速光芯片测试提供了首个可扩展的超宽带信号处理平台，标志着光子-电子融合技术迈向太赫兹时代的里程碑。

该成果以320 GHz photonic-electronic analogue-to-digital converter (ADC) exploiting Kerr soliton microcombs

为题发表在国际顶尖光学期刊《Light：Science Applications》。Dengyang Fang、Daniel Drayss为共同第一作者，Christian Koos为通讯作者。

研究背景

模数转换器（ADC）是通信、雷达和超快科学实验的核心器件，其性能直接影响信号处理的精度与速度。传统电子ADC受限于前端电子采样器件带宽和时钟抖动，当前最高带宽仅约100 GHz，难以满足6G通信、太赫兹雷达等新兴领域对超宽带信号（>300 GHz）的实时采样需求。尽管光子ADC可通过光学采样突破时间抖动瓶颈，但现有方案依赖笨重的锁模激光器，且采样率低、集成度差，无法兼顾高带宽与实用性。

德国卡尔斯鲁厄理工学院 (KIT) 团队联合瑞士洛桑联邦理工学院 (EPFL) 等国际团队提出了一项突破性解决方案，首次将Kerr孤子微梳集成至光子-电子ADC系统，通过三大协同技术创新实现性能跃升。团队采用高频优化的薄膜铌酸锂（TFLN）马赫-曾德尔调制器，支持超过300GHz的宽带信号调制，将电信号高效转换为光信号并在光域进行信号处理，克服了传统方案中信号在电域传递时的高频衰减难题；同时，基于硅基氮化硅微环谐振腔开发出芯片级Kerr孤子微梳光源，生成相位噪声极低（时间抖动仅3.1 fs）、稳定性卓越的多波长本振光源，通过光谱切片技术实现多通道并行相干检测，显著提升系统信噪比。此外，团队创新性地引入全系统校准与智能重构技

术，通过电光/光电传输函数的精准测量、多通道同步采样及频谱拼接算法，动态补偿器件的线性响应以及各通道之间的相位偏移，最终实现超宽带信号的无损还原。这一技术融合不仅突破了传统ADC的带宽瓶颈，更以高集成度架构为太赫兹级信号处理奠定了基础。

创新研究

超宽带电光调制器

超宽带电光调制器：采用薄膜铌酸锂（TFLN）马赫-曾德尔调制器（MZM），支持超300 GHz的调制带宽，将电信号高效转换为光信号。

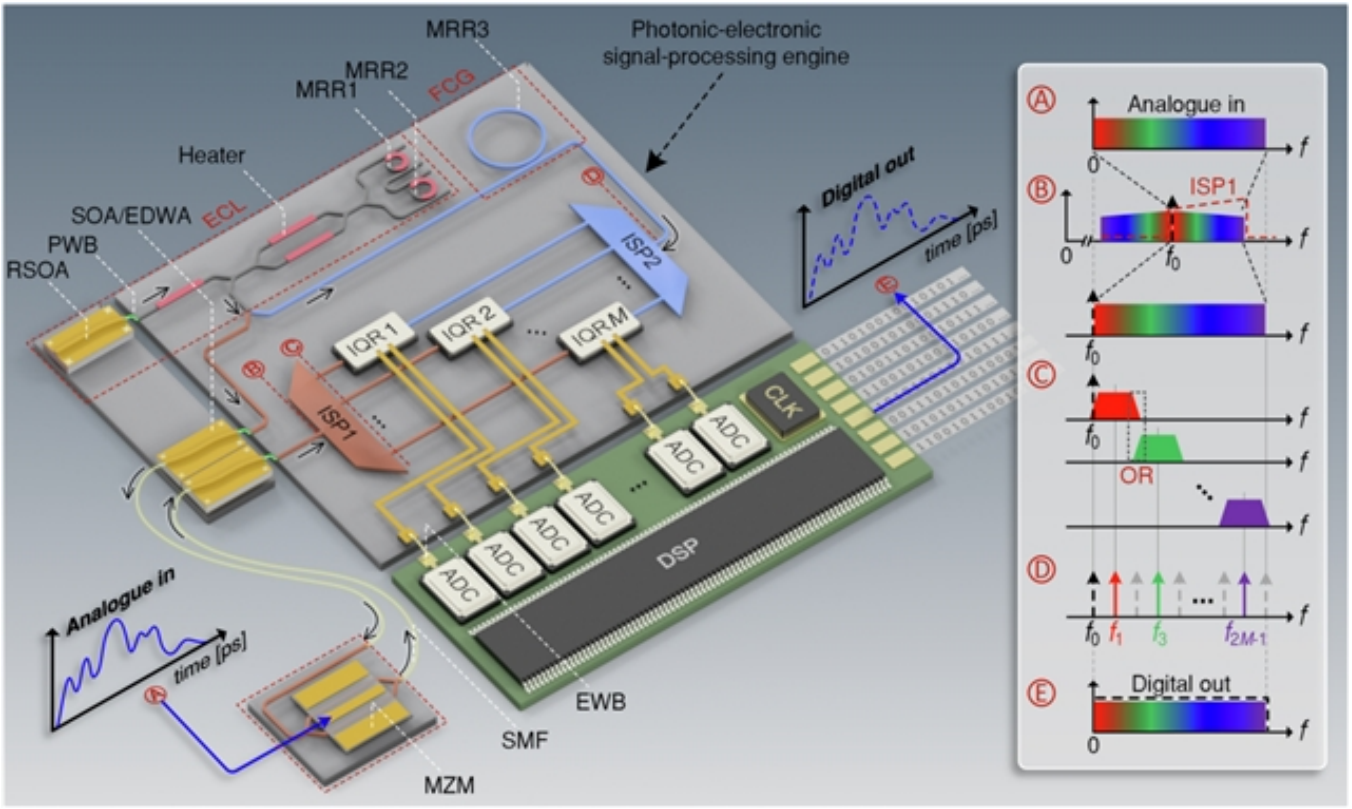


图1. 集成频谱拼接的光电子ADC。

图1为本文提出的一种基于光电信号处理引擎（Photonic-electronic signal processing engine）的集成频谱切片光子-电子ADC系统架构蓝图。其中，宽带模拟电信号（Analogue in）首先通过高速电光调制器（MZM）转换为光信号，并经由低损耗、柔性的单模光纤（SMF）传输至后端的光电信号处理引擎。在该引擎中，光信号被切片处理，并依赖Kerr孤子微梳作为相位相干的本振光源，实现并行相干探测采样，最终在数字域中重构并输出对应的数字化模拟输入信号（Digital out）。

Kerr孤子微梳光源

利用硅基氮化硅微环谐振腔生成低相位噪声、高稳定的Kerr单孤子频率梳，作为多波长本振光源，实现光谱切片与并行相干检测。该光源可提供上百根相位相关的等频距梳齿，大幅提升了所展示的光子-电子ADC系统在带宽上的可扩展性。

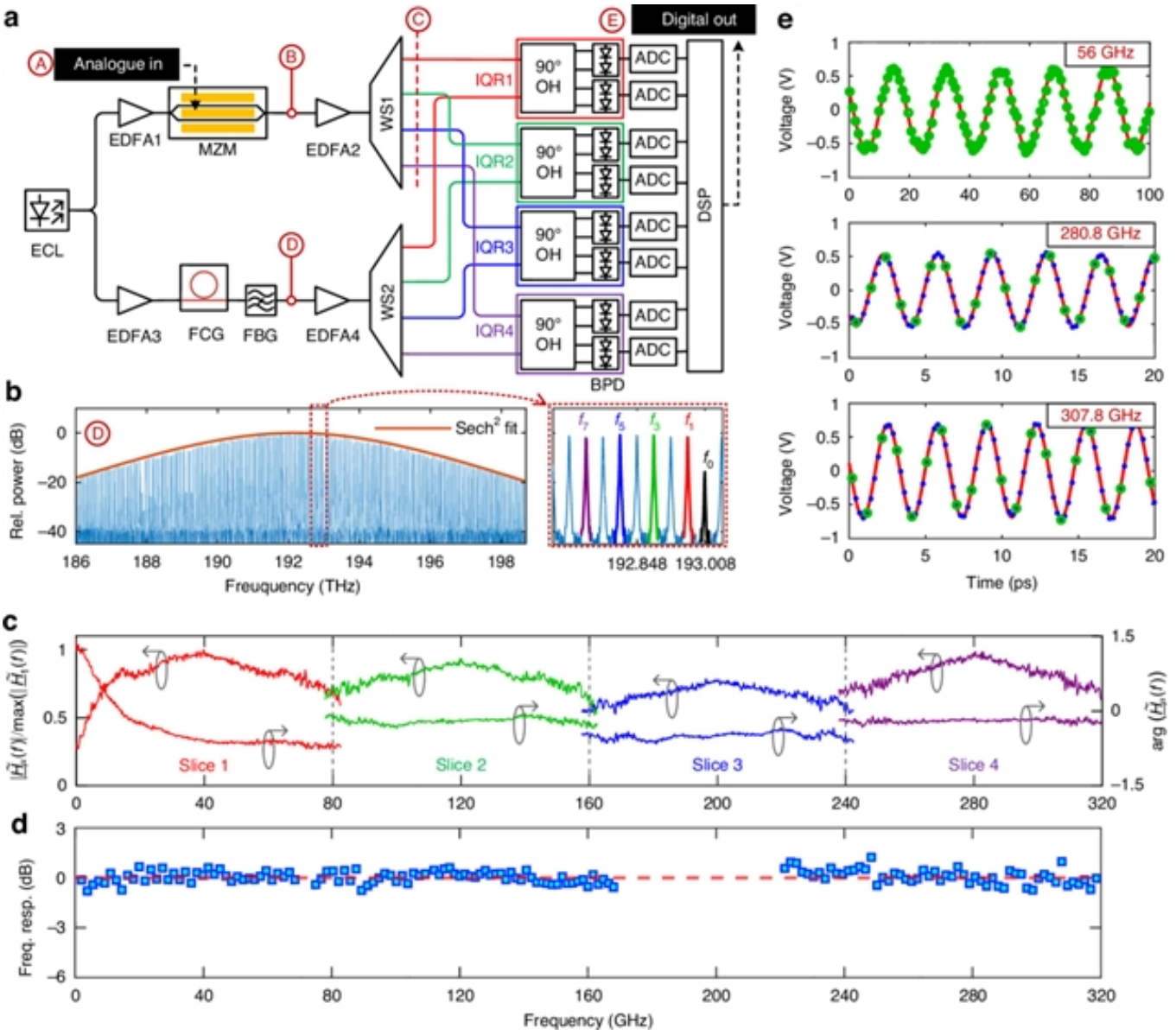


图2. 原理实验验证的光电子ADC。(a) 实验装置简化示意图，对图1中所示光子-电子ADC架构进行分立器件实验验证；(b) 单孤子Kerr梳光谱及所选用的本征梳齿放大图；(c) 基于稳定参考光波形测得的各探测通道的幅值和相位的频率响应特性；(d) 经校准后的光子-电子ADC系统的实测频率响应，中段缺口源于该频段实验设备的缺失，但整体仍可见该ADC系统在整个320GHz带宽范围内的平坦频率响应特性。

数字信号重构算法：

通过校准电光/光电传输函数，结合多通道同步采样与频谱拼接技术，精准还原原始信号波形。

实验中，团队成功单次测量捕获了包含24.4 GHz（30 GBd 32QAM）、233.4 GHz（40 GBd QPSK）和264.4 GHz（10 GBd 16QAM）的混合宽带信号，误码率（BER）均低于10??，满足前向纠错（FEC）阈值要求（图3）。

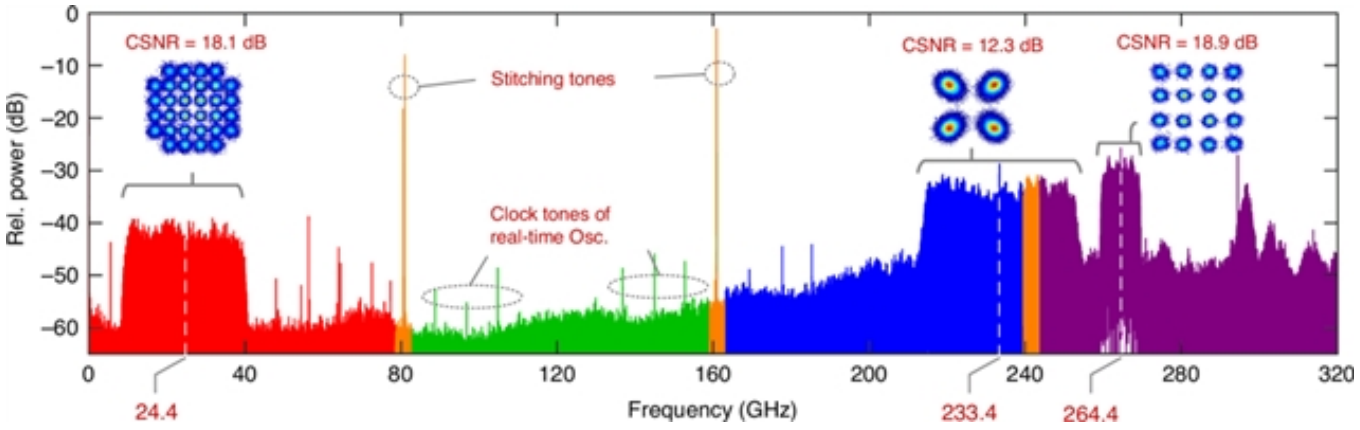


图3. 超宽带宽模拟信号的采样演示，由上述光子-电子ADC系统通过单次采样并在数字域重构获得。该宽带模拟信号由中心载频为24.4 GHz、233.4 GHz 和 264.4 GHz 的正交幅度调制（QAM）信号组成。三个星座图可从图中以水平括号表示的频段中提取。相邻频谱切片间的动态相位偏移补偿依赖于橙色所示的频谱重叠区域。

总结与展望

此项研究不仅验证了Kerr孤子微梳在超高速信号处理中的独特优势，更展示了光子-电子混合系统在带宽与集成化方面的革命性潜力。随着器件优化与工艺成熟，全集成太赫兹ADC有望推动通信、传感与计算领域的范式变革。

未来，该技术将推动6G通信（直接数字化毫米波射频信号，替代传统混频器与滤波器）、高速测试设备（支持200 GBd以上光芯片验证）及高分辨率雷达（亚毫米级目标探测）的革新。最终目标是通过硅光与薄膜铌酸锂异质集成，实现全芯片化太赫兹ADC系统，为超宽带信号处理提供紧凑、低功耗的解决方案。（来源：LightScienceApplications微信公众号）

相关论文信息：https://doi.org/10.1038/s41377-025-01778-1

特别声明：本文转载仅仅是出于传播信息的需要，并不意味着代表本网站观点或证实其内容的真实性；如其他媒体、网站或个人从本网站转载使用，须保留本网站注明的“ 来源 ”，并自负版权等法律责任；作者如果不希望被转载或者联系转载稿费等事宜，请与我们接洽。
作者：Christian Koos 来源：《光：科学与应用》

更多 科学进展 请访问 https://www.iikx.com/news/progress/

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，爱科学iikx.com转发