微波光子技术及应用专题

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022012601

微波光子技术在数字阵列雷达中的应用探讨

许方星*，崇毓华，梅　理，谭　敏，徐珍珠

（中国电子科技集团公司第三十八研究所，合肥 230088）

摘　要： 从国内外最新的数字阵列雷达发展趋势入手，总结了数字阵列技术向“宽带化、离散化、智能化、灵巧化”发展在调制自由度、信号特征处理、参数控制与算法加速方面亟待突破的问题，同时对比分析了微波光子处理的适配性及优缺点，以微波光子雷达实用化推进为目的，对光模数转换、光正交解调、光波形产生、光射频总线、轻薄化集成等微波光子技术在数字阵列雷达系统中的应用进行了展望。

关键词： 微波光子；数字阵列；超宽带；数字化收发；光模数转换；光正交解调

中图分类号： TN957.51　**文章编号：** 1001－5868(2022)01－0045－06

Implementations of Microwave Photonics in Digital Phased Array Radar

XU Fangxing, CHONG Yuhua, MEI Li, TAN Min, XU Zhenzhu

(The 38th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Hefei 230088, CHN)

Abstract: Based on analyzing the latest development trends of digital array radar, in this paper, it is summarized the problems that need to be solved in the aspects of modulation freedom, signal characteristic processing, parameter control and algorithm acceleration in the development of digital array technology to “wideband, discrete, intelligent and flexible”. Meanwhile, the suitability, advantages and disadvantages of microwave photonic technology are discussed. For pushing forward the progress of practical implementation, the prospects of several microwave photonic technologies in digital phased array radar system are analyzed, including photonic analog-to-digital conversion, photonic quadrature demodulation, photonic arbitrary waveform generation, RF bus, etc.

Key words: microwave photonics; digital phased array; ultra-wide band; digital transceiver; photonic analog-to-digital conversion; photonic quadrature demodulation

0　引言

雷达出现至今已历经 80 多年的发展历程，雷达体制、理论、方法和技术在目标、环境和任务等外部因素的驱动下不断发展演变[1]。在全球数字化浪潮的冲击下，尤其是过去 20 年模数/数模转换器、低噪声功率放大器等有源器件和 DSP，FPGA 等数字芯片的快速发展，雷达进入数字化时代已成为现实。将数字技术和阵列技术相结合，在发射和接收模式下均以数字波束形成(DBF)取代传统模拟波束形成(ABF)便产生了数字阵列雷达。数字阵列雷达从波束形成到数据处理均以数字方式实现，系统组成简单，具有幅相控制精度高、瞬时动态范围大、空间自由度高、波束形成灵活等区别于传统相控阵雷达的典型特征，已成为当今的一种主要雷达类型[2]。

微波光子技术近年来已成为雷达体制创新的研究热点，相关工作已完成原型样机及试验验证[3-9]。但关于微波光子技术在数字阵列雷达中的应用研究尚未见公开报道。如何基于光电子技术在数字阵列雷达的信号产生、接收、传输、处理等环节上的独特优势，融合产生新的能力和性能提升，是需要结合实际进行深入研究的。基于此，本文从最新的数字阵

收稿日期：2022－01－26.

*通信作者：许方星　E-mail：fxxu_2000@163.com

列雷达发展趋势入手，全面总结了数字阵列技术发展亟待突破的问题，同时对比分析了微波光子处理的适配性及优缺点，以微波光子雷达实用化推进为目的，对微波光子技术在数字阵列雷达系统中的应用进行了展望。

1 数字阵列雷达的特点及最新发展

现代战争攻防不断变化发展，临空、高超、无人机集群、多干扰密集目标群等新型目标带来了对象多样化和飞行特性的复杂性，并结合新型干扰复合手段，来执行侦察、监视、压制和打击任务。这要求雷达必须在复杂电磁干扰环境下，以更高数据率，短时间内实现对目标的可靠识别和对目标/目标群的高精度分辨，并剔除诱饵等影响，评估目标威胁程度，为控制系统提供有效的信息支援。雷达探测技术也将从当前集中式信息获取、预先设定的工作模式向分布式信息获取、自适应及智能化工作模式等方向拓展。

优异的目标探测、灵活捷变的波束扫描和多功能一体化能力使数字相控阵成为高效率、高效费比的多功能雷达最优技术路径。相比于只采用模拟波束形成的传统相控阵，高集成度和更高效的三代半导体器件(GaN，GaAs，SiGe 等)使数字阵列有源相控阵能以更低的成本、尺寸和重量实现更优的性能。模拟波束形成的波束质量会受限于阵列前端馈线网络中器件被调控的精确程度，而在数字阵列中收发均为数字波束形成，波束的形成就是信号各参数的数字加权运算。因此，数字阵列的波束宽度、指向和数目均灵活可变，幅度相位控制精度可提升一个量级以上。

理想的全数字阵列架构应在每个天线单元上实现发射与接收信号数字化与控制。由于单元级处理和随后的波束形成都是数字化，可演化出新的信号处理和波束形成方式，并在大阵列中通过极大的动态范围得以提供极高的灵活性。雷达系统的瞬时动态范围由单路接收机动态、接收机数量和脉冲压缩比等因素决定，而数字阵列的每个单元都对应着一路接收机。假设雷达各单元噪声不相关，则系统的瞬时动态范围相较于单通道接收机可提高 $10\lg(N)$ 分贝，其中 N 为天线单元数。基于大系统瞬时动态，数字阵列雷达可保留更多强杂波背景下的小目标信息，为提高探测低慢小目标能力提供了条件。

数字阵列架构由于具有独立数字化的可扩展阵面与灵活的波束形成方式，还能够为目标探测提供更多的自由度。基于空间自由度高的特性和数字化程度的提升，可支持进行自适应数字波束形成(ADBF)、空时自适应处理(STAP)等先进信号处理方法，提高了低径向速度目标检测能力。自由的波形写入与波束调度能力也可支撑软件化雷达的实现。不过考虑到全数字处理带来的数据量巨大和接收机复杂度等问题，采用单元级数字化也伴随着内在的技术风险和现实挑战，通常会根据实际需求，采用子阵级数字波束形成的方式来增加数字阵列相控阵雷达的可行性与灵活性。法国泰勒斯公司在 2018 年宣布新一代“海火”与“地火”数字多任务雷达进入制造阶段。这是一种全数字软件定义雷达，拥有近 100 个同时多波束的数字波束形成能力(分多个子阵面)，适应任务与工作环境的动态波束管理，可通过长的驻留时间来提高多普勒分辨率，缩短反应时间。该雷达可同时执行多个任务，可动态进行波束控制、接收多波束形成、驻留调度和波形处理。美国洛克希德·马丁公司研制了新一代远程识别雷达(LRDR)，将成为美国战略反导体系中的关键传感器，其基于数字阵列技术，可提供全天时的持续截获、跟踪和识别数据，为拦截武器、完成目标锁定与交战提供信息保障。俄罗斯在 2021 年国际国防工业博览会上，展示了新型“苏拉”多功能雷达，其通过模块化主动数字相控阵设计理念，不仅可为 A-135 防空反导系统提供弹道目标选择、指示和引导，还可有效跟踪卫星、太空碎片和其他在轨目标，被俄专家称为“太空之眼”。美国空军研究实验室的 BEEMER、美国海军的 FlexDAR、以色列艾尔塔公司的 MF-STAR 等近期项目均显示，数字阵列雷达正在带来日新月异的能力提升。

综合以上国外的研究进展，可以看到最新的数字阵列雷达发展情况遵循着技术发展的两条主线：占据更宽的频谱，以获得高的纵向分辨率和定位精度；占据更大的空间谱，以获得更高的横向分辨能力和定位精度。在占据更大的频率谱方面，向着高/低频段拓展、多波段、超宽带等宽带化方向发展；在占据更大的空间谱方面，向着分布式、无人机协同、稀布阵、虚拟长基线等离散化方向发展。另外，结合目前人工智能、大数据、认知处理等，数字阵列雷达的智能化、灵巧化也是研究热点。

2　数字阵列雷达对微波光子技术的需求分析

目前微波光子雷达技术的研究主要集中在模拟域信号处理方面，包括光控相控阵、单通道模拟去斜等，在高分辨率成像、宽带侦察等方面展现了独特的技术优势。但微波光子技术应用在数字阵列雷达中的研究仍处于攻关阶段。

将微波光子技术与数字阵列技术相结合的研究，一方面数字阵列技术可为微波光子雷达提供大的动态范围，很好地解决因光子损耗大、噪声系数差等固有问题导致的动态损失问题，是微波光子雷达极具实用化潜力的一种技术体制；另一方面，针对数字阵列“宽带化、离散化、智能化、灵巧化”的发展趋势，微波光子技术研究也应针对数字阵列在信号产生、接收、传输、处理等环节的独特需求提出相应的技术途径，从而解决数字阵列现实面临的及未来发展可能的瓶颈问题。二者互相促进，取长补短，从而产生能力跃升。

2.1　多维滤波的构建能力

从信号空间维度来看，目标检测、跟踪与识别的信号空间不断向高维度演化，数字阵列雷达逐步向多波段、多极化演变，从而在更宽的频域范围和极化域中更加有效地区分目标和环境的差异，以改善雷达的目标检测、低仰角跟踪等性能；数字阵列向宽带、MIMO 演变，采用瞬时宽带信号、正交波形则可提升雷达的分辨能力、截获概率等性能。

微波光子处理技术可以通过对信号进行多抽头分离，经过幅相调控、时频映射等操作后再求和的方式来灵活构建频域、空间域、能量域、极化域及角动量等各种维度的滤波效果，从而为数字阵列的有源前端提供更多的自由度资源。

2.2　功能闭环的信号特征处理能力

传统雷达发射信号波形在系统内进行预设，同时在接收路径上按照波形选择最优的匹配滤波方式，以获取最大的接收信噪比。但随着认知雷达概念的提出与深度学习算法的发展，未来雷达发射的波形将不再从固有的波形库中选择，而是根据实际环境感知回路中获取的信息进行精细调整；相应地，匹配接收的构建不再是基于模型，而是由深度学习算法给出具体滤波器参数。这就要求，对于未来可实现认知智能的数字阵列雷达，基于微波光子的信号产生与匹配接收必须对信号的幅度、相位、延时都具备灵活的参数调控能力，才可与人工智能算法形成功能闭环。

2.3　数字化接收与预处理能力

高效高精度的数字化接收能力是实现数字阵列最基本的需求。高精度的模数转化能力保证了回波数字化的动态范围，低时间抖动的数字化接收也可提升系统的改善因子，有效改善系统的杂噪比。

对于大规模的阵列化天线前端，单元级数字化带来的数据量是非常庞大的。即使采取子阵数字化的方式，其数据量仍远超传统窄带相控阵雷达。微波光子技术应用于数字阵列中，需能够在雷达时序要求的范围内完成数字化过程，同时根据雷达工作模式对信号的要求不同，可分选并按需进行模拟域的预处理，通过传存算一体化设计，减轻后端数字信号处理和数据处理的压力。

2.4　灵活、高效的参数控制能力

数字阵列能够实现具备环境适应性的低副瓣波束合成，必须具有可靠的阵列校准技术，同时在拥挤、对抗的环境中保性能运行，也取决于雷达在实际环境中运行时的保护措施及持续的在线校准。出厂前的内场校准无法满足数字阵列的实用化推广应用，因此需要提出高效、可靠的现场校准方法。如果使用微波光子技术进行信号延时量的调整，必须采用反馈校正回路的自闭环系统。

数字阵列雷达的前端控制码由 DDS 产生，均为数字型码值。这种形式的产生、存储与传输过程均简单便捷、稳定性高，也是数字阵列可大规模扩充的基础条件。这就要求应用于实际的数字阵列系统中的微波光子调控手段也需要数字化，而不能依赖于使用高位数 DA 来产生高精度模拟控制信号来调控的复杂手段，从而保证操控的快速响应与大阵列的适用性。

2.5　具有可逆性的光处理/光运算

数字阵列的发展对系统的集成度和小型化需求是极其迫切的，其发展的瓶颈是集成化工艺，但此限制的物理原因是非可逆操作导致的系统熵增，损失的信息量将以热量的形式耗散至环境中。因此，在追求高集成的微波光子处理架构中应尽量选择具有可逆性的光处理/光运算操作，才能有效改善大规模集成化带来的热量控制及环境适应性问题。

3 可应用于数字阵列雷达的微波光子技术

3.1 光模数转换技术

模数转换器(ADC)作为连接模拟信号与数字信号的桥梁,其性能指标如模拟响应带宽、采样率、有效位数等,对数字阵列雷达的能力提升至关重要。ADC 的模拟响应带宽越大,雷达接收机的微波接收通道设计限制就越宽裕,有利于实现更简洁、紧凑的数字接收机;ADC 采样率越高,接收机可处理的微波瞬时带宽越大;有效位数越高,接收机的瞬时动态范围越高。为突破电 ADC 的性能指标瓶颈,利用光子技术大带宽、低抖动优点的光子辅助模数转换(OADC)技术引起了广泛的关注和研究。经过 40 余年的发展,国内外学者提出了多种 OADC 方案,如基于调制器阵列或孤子自频移的全光量化方案、基于时域拉伸的光子辅助 ADC 方案,以及基于锁模脉冲或调制光脉冲的多通道拼接 OADC 方案。

对于数字阵列雷达应用需求而言,目前较为匹配的 OADC 方案为基于超短光脉冲的多通道拼接方案。意大利 CNIT 于 2014 年报道的微波光子雷达 PHODIR,采用被动锁模脉冲激光器作为脉冲光源,通过时分复用拼接采样技术实现了模拟带宽达 40 GHz,采样率为 400 MSa/s,有效位数为 7 bits 的 OADC 系统[3]。国内的上海交通大学也报道了基于光波分复用的拼接采样技术[10]。

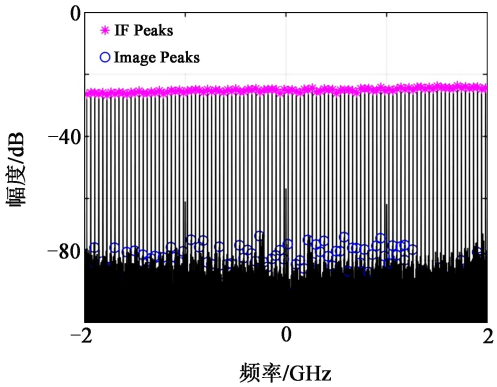
光子辅助的模数转换技术将 ADC 的模拟带宽、采样率、有效位数等关键指标推升到了一个新的高度,但同时基于分立光器件的 OADC 系统也带来了成本、集成度、环境适应性等新问题。2012 年美国麻省理工学院的研究团队通过硅基光子芯片集成技术实现了基于波分复用拼接采样的 OADC 芯片,在 2.1 GSa/s 采样率下对 10 GHz 的模拟输入信号实现了 3.5 bits 有效位数的数字采集。2019 年,德国布伦瑞克大学研究团队通过微波调制光梳技术实现了对光载微波信号的高速采样,该研究将电光采样芯片和电控驱动电路进行了单片光电混合集成,工作带宽 12 GHz,采样率达到 36 GSa/s。

3.2 数字化接收的正交解调技术

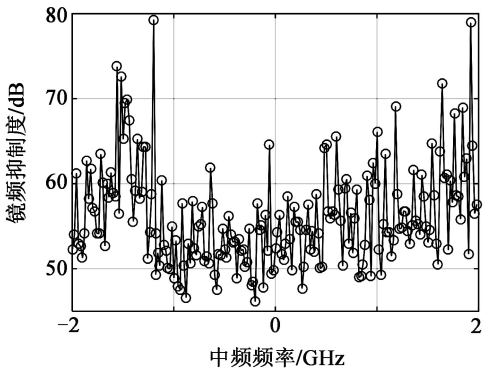
雷达系统中的数字化接收方案常采用超外差体制,通过微波外差变频滤波实现高动态范围和杂散抑制,但超外差体制存在模拟链路环节多、功耗成本较高以及跨频段、大带宽设计难度较高等问题。低频段的雷达系统可采用射频直接数字化体制对雷达回波信号直接进行数字化采集,从而简化微波接收通道。但受限于 ADC 的采样率和模拟带宽等指标,射频直接数字化体制难以满足雷达系统日益提升的高频段、大带宽需求。此外,还有一种零中频收发体制,通过模拟正交解调技术,将射频信号转换为两路正交的零中频信号进行数字采集,可将接收机的瞬时处理带宽增大 1 倍,同时通过切换本振频率能够灵活适配不同工作频段雷达系统的需求。传统微波零中频技术由于镜频干扰问题严重影响了接收机的瞬时动态范围,在雷达系统中的应用较少。利用光子处理技术超宽带、高幅相一致性的优势来解决零中频接收机中的镜频干扰问题,实现大动态的零中频体制数字阵列雷达,有望简化数字接收机的微波链路,拓展数字雷达的瞬时带宽和工作频段。

目前,主要的微波光子正交解调方法可分为三类:基于 90°光混频器的微波光子正交解调方法,基于调制器偏置电压控制的正交解调方法以及基于偏振控制器移相的正交解调方法。三种方法均通过电光调制器将射频与本振信号调制到光载波上进行光混频,区别在于 90°正交移相的实现方式不同。通过调节光场相位变化从而实现光载微波信号移相的方式一般需要使用光滤波器或 IQ 调制器来获得单边带光载微波信号,其中光滤波器的使用会限制微波光子正交解调的工作频率范围,IQ 调制器在信号带宽较宽时单边带调制效果会下降。在实际应用中,基于微波光子技术的零中频接收机还面临光正交解调之后的对中频信号进行处理的元器件引入额外幅相失衡的问题。

图 1 为中国电科 38 所设计的基于光延迟线的微波光子零中频接收方案,以光传输延时的方式实现本振信号的90°移相,本振相位调控在微波频段完



(a) 不同频点射频信号的零中频采集结果



（b）　接收机镜频抑制度

图 1　光子零中频接收的镜频抑制结果

成，受环境影响较小。此外，在 ADC 进行模数转换之后通过数字校正技术降低光电探测器、中频电处理元器件的幅相一致性影响，可实现 4 GHz 瞬时带宽内的镜频抑制度优于 40 dB。

3.3　基于 ROF 的射频总线技术

在雷达系统中，通常将光信号从阵面上拉远传输到机舱中进行信号接收处理，从而大幅提升前端阵面的剖面厚度与集成度，提升雷达系统的机动性和抗摧毁能力。在拉远传输过程中，外界环境扰动会影响传输链路的相位，进而影响传输链路传输的上行本振信号和下行回波信号的相位。

为应对强振动、宽温变环境下的相位扰动，可采用主动反馈控制与数字补偿相结合的方式来实现稳相传输。其基本原理为利用远端的返回信号，通过无模糊鉴相器与本地信号鉴相得到光纤链路的瞬时延时扰动，用这个瞬时延时扰动控制电移相器来反馈补偿光链路物理延时扰动，从而使得多个远端的本振信号的相位一致且不受链路环境的扰动影响。本振信号经过传输链路传输至远端，一部分经光电转换后用于雷达系统，另一部分由光学经反射回近端，提取往返传输的本振信号相位变化。将往返传输的本振信号与本地的本振信号输入无模糊鉴相器，可以提取得到传输链路的扰动信息，并利用扰动信号对发射的本振信号进行相位补偿，以提升传输链路的抗干扰能力。

3.4　与频率源结合的光电混合波形产生

近年来，基于光子信号处理的宽带信号生成得到了国内外研究人员的广泛关注，很多方法被提出[11-14]。其中，可满足数字阵列雷达对于信号产生相位噪声、线性度及波形灵活写入要求的主要有以下两种。

一种是独立光脉冲纵模的幅度和相位的调制技术。由锁模激光器或光电振荡器产生光脉冲的谱线是离散的，谱线间隔等于脉冲的重复频率。在一般的光脉冲整形系统中，对谱线的控制不是单根的，而是成批的，这就使得控制的结果不够精确。为了解决这个问题，对于脉冲每一个单根谱线的控制成为了研究人员感兴趣的课题。因为脉冲时域波形与频谱是傅里叶变换的关系，通过精确控制脉冲每根谱线的幅度与相位，实现脉冲时域波形的精确控制。

另一种是基于光谱整形和波长到时间映射技术，频谱非常宽的超短光脉冲经过光滤波器进行光谱整形后，经过一段色散介质，在色散介质中光脉冲的频谱分量在时间上分散开，从而在输出端实现了波长（频率）到时间的映射，即输出脉冲的时域形状与色散介质输入端脉冲的频谱形状一致。这种方法的最大优点是脉冲的整形从时域搬到了频域，从而可以使用种类非常丰富的光滤波器，如空间光调制器、正弦滤波器及形状可以定制的光纤光栅等等，大大简化了系统结构。

3.5　光子阵面轻薄化技术

微波光子链路已大量应用于射频光传输、光通信等领域，但在数字阵列雷达系统中应用较少。微波光子组件主要用于实现电光、光电的相互转换，装配于阵面结构中。为使相控阵面满足机动性和平台试装性要求，必须结构紧凑、集成度高，需针对子阵级应用开展轻薄化微波光子组件的工程化技术研究[15]。

两种典型技术，一是光子异质异构集成技术。InP 基材料、Si 基材料和 $LiNbO_3$ 材料在微波光子应用中均具有各自的优缺点。InP 材料非常适用于激光器、调制器和探测器，而且发展成熟，但光波导传输损耗大，不利于大规模的光子芯片集成；Si 基光子器件集成度高、工艺成熟、成本低，但在光源、线性调制器方面的研究存在技术瓶颈；$LiNbO_3$ 材料目前在电光调制器方面具有独特优势。基于 InP-Si，$LiNbO_3$-Si 等光子异质异构集成技术，可以发挥各种材料的优势，实现不同材料的光子器件集成，是实现大规模多功能光子集成芯片的有效技术途径。

二是光子-射频混合集成技术。通过光电混合集成设计，使得光芯片与电芯片之间形成有效的信号互连，实现集成微波光子微系统，是微波光子器件芯片发展的最终目标。其中硅通孔（TSV）技术是光电三维堆叠混合集成的技术基础。IMEC 在

2021年的ECOC上报道了其在TSV技术方面的最新进展，首次验证了TSV对112 Gb/s NRZ高速信号的传输性能。TSV通过垂直互联的方式，降低了电互联的长度，降低了功耗，提高了信号互联的密度，是高速光电三维集成系统的关键技术。

3.6 光计算/算法加速

光计算是操控携带数据的光信号用于特定用途的方法集合。光子作为波色子，具有高速、高并行、低损耗的特点，使得光计算相较于传统电计算具有独特优势的物理学潜力[14]。一是在传输信息时光子具有极快的响应时间。光子脉冲可以达到飞秒量级，信息处理速率可以达到几十太比特每秒(Tb/s)，性能提升数百倍。二是光子具有极强的存储和计算能力，且易构建可逆逻辑门操作，从而实现超低能耗运算。三是光子不带电荷，互耦性较电子弱，具有极强的并行和互联能力。因此光计算在加速雷达数据处理速度、降低雷达运行功耗等方面极具潜力。目前，基于光子的逻辑运算在光学量子系统中应用广泛，但如何进一步拓展至宏观尺度值得进一步研究。

4 结束语

推动微波光子实用化，应符合雷达技术的宏观发展规律，顺应技术趋势与潮流。只有具备普适性、主流性、通用性的特点，才能实现降成本、大规模应用。得益于当今光通信行业的投入与发展，光电子元器件水平与光电集成工艺正飞速提高，微波光子技术应用到数字阵列雷达中的优势与潜力逐渐被人们所接受。本文分析了数字阵列雷达最新的发展趋势，提出在此领域中开展微波光子实用化的技术要求，对标目前不同光子处理技术的发展情况，对应用模式和技术路径进行了思考与展望。

参考文献：

[1] 杨建宇. 雷达技术发展规律和宏观趋势分析[J]. 雷达学报，2012，1(1)：19-27.
Yang Jianyu. Development laws and macro trends analysis of radar technology[J]. J. of Radars，2012，1(1)：19-27.

[2] 吴曼青. 数字阵列雷达的发展与构想[J]. 雷达科学与技术，2008，6(6)：401-405.
Wu Manqing. Development and future design of digital array radar[J]. Radar Science and Technol.，2008，6(6)：401-405.

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

[4] Ghelfi P，Laghezza F，Scotti F，et al. Photonics for radar operating on multiple coherent bands[J]. J. of Lightwave Technol.，2016，34(2)：500-507.

[5] Fulton C，Palmer R，Yeary M，et al. Horus：A testbed for fully digital phased array radars[J]. Microwave J.，2020(5)：18-22.

[6] Li R M，Li W Z，Ding M L，et al. Demonstration of a microwave photonic synthetic aperture radar based on photonic-assisted signal generation and stretch processing[J]. Opt. Express，2017，25(13)：14334-14340.

[7] Zhang F Z，Guo Q S，Zhang Y，et al. Photonics-based real-time and high-resolution ISAR imaging of non-cooperative target[J]. Chinese Optics Lett.，2017，15(11)：112801.

[8] Xu S F，Zou W W，Yu L，et al. Ultra-high range resolution demonstration of a photonics-based microwave radar using a high-repetition-rate mode-locked fiber laser[J]. Chinese Optics Lett.，2018，16(6)：062801.

[9] Wang A L，Wo J H，Luo X，et al. Ka-band microwave photonic ultra-wideband imaging radar for capturing quantitative target information[J]. Opt. Express，2018，26(16)：20708-20717.

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

[11] 吴钟涵，高一然，戴 键，等. 光学微腔在微波光子雷达系统中的应用[J]. 雷达科学与技术，2021，19(2)：183-194.
Wu Zhonghan，Gao Yiran，Dai Jian，et al. Applications of optical microresonators in microwave photonic radar system[J]. Radar Science and Technol.，2021，19(2)：183-194.

[12] Capmany J，Mora J，Gasulla I，et al. Microwave photonic signal processing[J]. J. of Lightwave Technol.，2013，31(4)：571-586.

[13] Capmany J，Ortega B，Pastor D. A tutorial on microwave photonic filters[J]. J. of Lightwave Technol.，2006，24(1)：201-229.

[14] Minasian R A. Photonic signal processing of microwave signals[J]. IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques，2006，54(2)：832-846.

[15] Marpaung D，Yao J P，Capmany J. Integrated microwave photonics[J]. Nature Photonics，2019，13(2)：80-90.

作者简介：

许方星(1983—)，男，湖北省黄冈市人，博士，高级工程师，主要研究方向为微波光子雷达技术。