

跨代雷达微波光子技术:机遇与挑战

王凯¹, 张业斌¹, 张方正²

- (1. 中国电子科技集团公司第三十八研究所, 安徽合肥 230088;
2. 南京航空航天大学雷达成像与微波光子技术教育部重点实验室, 江苏南京 210016)

摘要:本文阐述了跨代雷达技术发展趋势以及五代雷达应具备的阵列化、宽带化、网络化、综合化、智能化等典型特征,总结了微波光子的技术优势以及在跨代雷达典型应用场景中可为系统提供的效能增量。文中重点分析了当前微波光子技术在链路性能、集成度、阵列化、工程化等方面面向光子雷达实际应用所需解决的主要问题,并分别阐述了解决这些问题的基本思路和方法。最后给出了相干光新体制的基于光子集成的未来全光雷达系统的基本架构、实现方法与技术发展建议。

关键词:微波光子; 全光雷达; 技术瓶颈; 发展建议

中图分类号:TN958 文献标志码:A 文章编号:1672-2337(2021)02-0168-04

Microwave Photonic Technology for Next Generation Radar: Opportunities and Challenges

WANG Kai¹, ZHANG Yebin¹, ZHANG Fangzheng²

- (1. The 38th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Hefei 230088, China;
2. Key Laboratory of Radar Imaging and Microwave Photonics, Ministry of Education, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: This paper expounds the development trend of cross-generation radar technology and typical characteristics of the fifth-generation radar, such as array, broadband, network, synthesis and intelligence. The advantages of microwave photonic technology and the incremental efficiencies for radar system in the typical application scenarios are summarized. The main problems to be solved in practical applications of photonic radar are analyzed, such as link performances, integration level, array, and engineering. And the ideas and basic methods to solve these problems are given respectively. Finally, the basic architecture, implementation methods and technological development suggestions of the future all-optical radar based on new integrated coherent light system are given.

Key words: microwave photonic; all-photonic radar; technical bottlenecks; development suggestions

0 引言

随着电子信息技术的发展,未来战争呈现出大纵深和立体化作战空间,要求雷达等军事电子装备必须能在时、频、空、能等全域实现电磁信息的感知,任何一个域上的短板都有可能导致战场制电磁权的丢失。先进的雷达电子装备通过高度发达的信息获取、控制和使用技术,能实现战场态势感知和传递的全面性、准确性和及时性,势将成为未来战争中的必备。

1 跨代雷达技术发展趋势

纵观雷达发展历程,按照技术体制已经经历了四代,分别是非相参、相参、一维相扫和二维相扫雷达。雷达的发展也是伴随战机发展历程的不断升级和演进。第一代雷达主要针对螺旋桨飞机,第二代雷达主要针对高速喷气式飞机,第三代雷达主要针对低空突防飞机以及巡航导弹,第四代雷达主要针对隐身飞机。

未来五代战机的典型特征主要包括超隐身、空天一体、高机动、无人化、电子对抗等,这些在

未来空天战争中将对国土防空造成严重威胁。现有的雷达形态将变得无法适应,捉襟见肘。那下一代即第五代雷达会是什么样的,有怎样构想与布局?这将成为未来一段时间内雷达发展的重要主题,值得雷达技术研究人員去深思和探索。

五代雷达应具备阵列化、宽带化、网络化、综合化、智能化等典型特征,才能从时、频、空、能、极化等多维度进行全面的感知,并通过智能化处理实现多功能的综合与资源的最优管控调度,从而有效应对五代战机的威胁。

微波光子作为一种涉及光子学、电子学及集成光电子等多学科交叉的新兴技术方向,在满足跨代雷达特征方面有望提供新的思路和解决方案,突破当前电子学技术面临的瓶颈问题^[1-3]。

2 跨代雷达微波光子技术机遇

微波光子学的内涵是通过光子学手段解决微波与数字领域的技术瓶颈,其天然的技术优势主要包括:低损耗的射频光纤链路稳相传输,光波导真时延,宽带调制与解调链路,光波长与偏振等光学参量的多维资源复用,高Q值的光学谐振腔等。

这里列举了一些适合发挥微波光子技术潜在优势的典型雷达系统应用场景,这些技术优势能为雷达系统提供效能增量。

在大型宽带相控阵雷达系统中,核心技术之一是解决雷达的宽带宽角扫描问题。传统的移相器无法满足宽带宽角的波束无倾斜扫描要求和孔径渡越问题。而微波或者数字真延时技术在高频宽带大阵列场景应用对技术和成本要求极高,微波开关延时线难以兼顾大损耗与低驻波的微波放大链路之间的矛盾,往往各态一致性较差,带内起伏较大,相位非线性较严重,对宽带波束扫描效果造成较大影响;数字延时技术在宽带场景,如10 GHz左右的瞬时带宽,对于AD/DA器件的速率要求较高,造价高、功耗也大,从当前器件可获得性与成本等因素考虑,在单元级甚至子阵级进行数字宽带延时技术应用都并非最优方案。而光子延时线技术可以有效解决数百个电磁波波长的空间延时补偿,并且光开关的各态一致性可以控制得很好,优良的宽带调制与解调链路性能可以实

现带内起伏和相位非线性的高指标要求,并且在宽带场景应用时,对处于非第一级链路噪声系数和动态范围的要求较低,通过前置低噪声放大器,当前的链路的微波指标可以满足系统设计要求,然而当前的微波光子链路有较大的增益损失,需要进行增益补偿,多级放大也同样需要精心的设计才可以获得优良的微波性能指标。

在宽带成像与识别雷达系统中,优良的宽带波形产生与接收机性能是关键,通过微波光子实现波形的产生,主要有微波光子倍频法、光子辅助数模转化法、光子频时映射法、光注入半导体激光器法、光信道综合法等。在宽带接收机方面,主要有光去斜接收、光电模数转换、光信道化接收等方法的研究。这些方面的研究对于降低射频数字器件的要求具备一定的优势,但需要通过光子集成与新机理的方法进一步加强宽带收发性能与集成度要求。要特别关注对于高性能实用化的宽谱集成光频梳,高重频、低超模噪声、低jitter抖动的锁模激光器的研究^[4-5]。在光电模数转换方面,要着手研究基于新方法的全光采集、量化与光处理的技术研究,对业界现有的“光采样+电量化+数字电域处理”技术路径形成完善与补充,进一步发挥全光处理的优点。

在空基雷达系统中,核心技术之一是降低频率源的相位噪声水平,光电振荡器作为一种新颖的高性能振荡器有望极大提升空对地强杂波背景下的弱目标探测能力。光电振荡器借助光延时技术实现高品质因数储能环路,能直接产生具备超低相位噪声的高频的信号^[6-7]。目前国内先进的光电振荡器产生10 GHz信号的相位噪声低于-150 dBc/Hz@10 kHz^[8],应用于雷达频率源能显著提升雷达系统探测性能。而数km的光纤环路,在面对宽温、振动等应用场景是个不小的挑战,应进一步尝试不采用长光纤从而提升谐振腔Q值的新方法,此外,在不损失光电振荡器相位噪声指标的前提下如何进一步提升边模噪声的抑制能力也值得深入研究。

在分布式雷达系统中,核心技术主要包括雷达节点的相参同步技术,当前基于微波光子毫米波生成与远距离稳相传输技术,国外已经在ALMA系统中得到了应用。目前的射频信号光纤稳相传输技术大都通过补偿或消除光纤延时抖动

来实现,具体的方法可分为两大类^[9-10]:基于锁相环的延时抖动补偿稳相传输方法与基于混频的相位抖动消除稳相传输方法。现有的报道中射频信号光纤稳相传输后的频率稳定度已经能达到 $5 \times 10^{-19}/\text{天}$ ^[11]。基于锁相环的稳相传输基本原理是通过一个锁相环路使传输后信号与高稳定频标的相位保持锁定,此方法有较为成熟的理论和众多的应用实例^[12],但补偿速度与范围受到器件的限制。基于混频的稳相传输技术是近几年提出的新型稳相传输方法,不需要反馈控制任何反馈控制器,通过混频来巧妙消除传输中引入的相位抖动,具有补偿速度快,补偿范围不受限制的优点,有望在未来分布式雷达中发挥重要的作用。

3 目前技术瓶颈与发展思路

目前微波光子行业的“痛点”主要有如下几个方面:

1) 微波光子链路性能指标差。在现有能够优化的器件指标中,最核心与有效的优化方向是改善电光调制器的半波电压 V_{π} 参数指标,该指标表征了电光转换的效率, V_{π} 值降低 1 倍,链路的噪声系数将改善 6 dB。当前国内行业器件的最好水平 V_{π} 为 4 V 左右,而国外行业器件的最好水平在 1 V 左右,可以推算出国内外行业微波光子链路噪声系数指标差距至少在 12 dB 左右。

2) 微波光子系统集成度低。当前激光器、调制器、探测器等高性能实用化器件依然是分立件,功能链路还是以光纤链路为主,体积较大。

3) 光芯片的波导损耗大。光开关延时芯片的主流技术路径之一是 SOI,但国内行业工艺线提供的 PDK,其波导损耗达 1.5 dB/cm 之多。

4) 大规模光控阵列实现难度大。非相干光合成受限于波长资源,难以在全光实现大规模阵列波束合成。以光学 C 波段波分复用通道间隔 200 GHz 为例,通道数在 25 个以内。

5) 工程化有待加强。电光调制器的热释电效应与偏压控制以及闭环光链路的宽温、振动的稳定性问题尚未得到较好解决。

针对以上技术瓶颈,解决和发展的思路如下,这些方面也是国内外研究的热点。

一是要通过研制新材料、新机理的电光调制

器来提升链路性能指标。传统的铌酸锂晶体材料的电光系数受限于物理特性,已经接近行业极限,而铌酸锂薄膜 LNOI 新材料引起了业界极大的关注与兴趣,有望改善电光调制器的半波电压参数,实现链路的高效率电光转换,降低链路的噪声系数。

二是要发展光子异质异构集成技术,提升系统集成度。研究开发各类高性能激光器、调制器、探测器以及无源波导、低噪声光放大等芯片,并研究异质异构的光电集成工艺。

三是要发展高性能光开关延时芯片,着力通过优化设计与改进工艺联动实现低损耗波导。应结合国内自主可控的工艺线平台,重点研究 SOI 低损耗波导的设计,并研究提升 SOI 波导耐受光功率的方法。

四是要发展相干光波束合成新技术体制,来改善非相干光合成阵列规模受限于光波长资源不足的难题。

五是要通过多学科交叉融合,提升器件与链路的工程稳定性。要研究电光材料特性从而改善电光调制器的热势电效应,通过电子学、微波、结构、环控与工艺等多种手段去解决闭环链路的宽温、抗振问题。

4 下一代全光雷达技术展望

在五代雷达要求的阵列化、宽带化、网络化、综合化、智能化等典型特征方面,更多的是要将上述微波光子技术及其特点进行融合的应用与创新。

此外,在微波光子雷达系统层面,需要进一步深入研究全光雷达的系统架构及其实现方法。这里,我们给出了一个有望实现的全光雷达系统架构,如图 1 所示,其特点是充分发挥出相干光新体制的优势,以此来实现全光的链路接口形式,以避免频繁的电光/光电转换极大恶化系统微波性能指标,该系统在光域综合性地完成波束形成、模拟信号处理、滤波、变频、放大以及波形产生等功能;而实现相干光新体制的微波光子雷达系统只有充分发挥出光子集成的优势,才能更好地实现光相位的稳定控制。

