

微波光子技术在电子战中的应用探讨 (特邀)

周 涛, 李 涛, 谢爱平, 何梓昂, 徐嘉鑫, 李 睿

(中国电子科技集团公司第二十九研究所, 四川 成都 610036)

摘要: 电子战是夺取信息化战争的关键力量之一, 而微波光子技术由于其宽带性、高速性、并行性、小巧性等特征与电子战能力提升的需求高度匹配, 已经成功应用于信号产生、传输及处理等环节中。首先从电子战系统的作战要求和能力特征出发, 分析了影响电子战效能的核心要素; 进而探讨了微波光子的特点及其提升电子战能力的原因, 并以光学波束形成成为典型应用, 分析了微波光子给电子战系统带来的能力提升优势; 最后, 面向电子战向电磁频谱战转型的发展需求, 对微波光子的发展趋势进行了展望。

关键词: 电子战; 微波光子; 超宽带; 阵列; 信号处理

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20211049

Application and development of microwave photonics in electronic warfare (*Invited*)

Zhou Tao, Li Tao, Xie Aiping, He Ziang, Xu Jiabin, Li Rui

(The 29th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chengdu 610036, China)

Abstract: The electronic warfare is a key force of the information war, whose capabilities can be enhanced based on microwave photonics (MWP) technology due to the broadband, high speed, parallelism, and compactness. Microwave photonics technology, as applied to electronic warfare systems, involves the signal generation, transmission, and processing. Firstly, the mission and capability requirements of electronic warfare were presented, and the core elements affecting the effectiveness of electronic warfare was analyzed. Secondly, the advantages of MWP applied to the electronic warfare were discussed in detail. Taking the optical beam forming as an example, MWP technology overcomes the beam-squinting effect. Finally, towards the transition from electronic warfare to electromagnetic spectrum warfare, the challenges and development trend of MWP were proposed.

Key words: electronic warfare; microwave photonics; broadband; array antenna; signal-processing

收稿日期:2021-04-11; 修订日期:2021-06-08

作者简介:周涛,男,研究员,博士,主要从事微波光子学和电子对抗应用技术方面的研究。

0 引言

现代化战争最重要的特征之一是基于网络信息体系的联合作战,其信息获取、信息传输与精确打击的作战网络都更加依赖于电磁频谱,尤其是基于移动平台的各种机动作战,电磁是必不可少的物理基础。如今,电磁频谱已成为横跨多个作战域、贯穿战争始终的作战空间,电磁频谱的利用与控制成为决胜现代战争的关键,而电子战就是电磁频谱作战的核心要素之一。

电子战是“为确保己方使用电磁频谱,同时阻止敌方使用电磁频谱所采取的行动与技术”^[1]。一般地,电子战的使命主要包括三个方面:一是对战场雷达、通信、成像、遥感等各种以电磁波为载体的辐射源进行侦察,包括发现、测量、定位、识别,并形成电子情报或战场电磁态势;二是对具有威胁的上述电子设备进行干扰,使其在干扰期间内丧失探测、跟踪、成像、识别、通信等功能,达到保护我方目标或者掩护作战突防等目的;三是对特定电子设备的物理摧毁,包括通过高能微波武器直接摧毁敌方电子系统的各种电子元器件,使其永久性毁伤,如通过反辐射导引头,引导导弹打击敌方雷达、通信等辐射节点的天线,使其物理丧失功能。可见,无论是哪种作战使命,电子战都是以电磁空间为作战域、以敌方的电磁作战节点和体系为作战对象、以信息攻防为作战使命、以信息博弈和信号处理为技术内涵的新时代作战方式和军事电子技术。

由于电子战是信息武器而非常规火力武器,其作战效能发挥取决于信息的获取、反制、控制等能力,而这些能力与系统的技术体制和处理方法密切相关。传统的射频技术和近年来主流的数字处理技术已经越来越难以满足电子战的需求,因此,具备交叉融合特性的微波光子技术孕育而生,并在电子战中得到了广泛应用。但是,微波光子为什么能够和电子战的需求匹配?能够给电子战带来哪些能力提升?未来又将向哪些方向发展?这些问题尚未详细讨论过。因此,文中首先分析了现代信息化战争中电子战面临的技术挑战及其本质问题,梳理了其技术要求与现有技术体制的不足,进而探讨了微波光子的特点及其提升电子战能力的原因,并结合典型应用分析了微波光子给电子战系统带来的能力提升优势,最后,文

中面向电子战向电磁频谱战转型的发展需求,展望了其发展方向。

1 电子战面临的技术挑战

1.1 电子战的基础问题

电子战的业务类型很多,整体上可以分为电子侦察、电子干扰和电子毁伤几个大类。其中电子侦察是电子战的首要环节,是干扰和摧毁的前提条件,且从技术上对带宽性和高增益等性能的要求也最具代表性。因此,文中以典型的战场电子侦察为例,考察电子侦察接收机需要面向战场多平台、多类型、多频段、多方位以及复杂电磁背景的技术需求,如图 1 所示。

图 1 说明了电子侦察通常不是一对一的目标观测,而是对广大战场空域中各种不同用途、不同平台、不同频段、不同参数的辐射源的综合侦察问题。由于战场军民融合的电磁环境非常复杂,且雷达种类众多、工作参数多变,电子侦察想要全面掌握战场的电磁态势非常困难,核心挑战包括:

(1) 未知的频率:雷达对象的工作频段从 0.38~40 GHz 的常用频段皆有可能,且随着 3 mm 波乃至 THz 等更高频段的雷达对象出现,频率还得进一步扩展。此外,虽然绝大多数雷达的工作带宽在 MHz 量级,但很多先进雷达采用了宽带跳频或宽带高分辨率成像等雷达工作模式,工作带宽可以达到数百 MHz 甚至数 GHz,这就要求电子战设备的工作频段要尽可能全覆盖,且瞬时带宽尽可能宽,至少要大于雷达的跳频/成像带宽。

(2) 未知的方位:雷达对象的空间分布可以很广泛,特别是对于战机、导弹等机动辐射源或新部署雷达,其方位是难以预知的。此外,由于电子战是被动接收雷达的信号,如果运动中的雷达不辐射信号,电子战装备侦收到的方位并非连续、难以预测。因此,电子战通常需要大空域瞬时覆盖能力,例如战斗机在高机动的空战格斗中,威胁来自全方位,此时电子战的雷达威胁告警设备通常需要 360°全向覆盖。

(3) 未知的时间:对侦察系统而言,作为非配合目标的雷达,其脉冲宽度、重复频率、开关机时间、波束扫描方式、扫描周期等时域参数是不可预知的,尤其是相控阵等新体制雷达,其灵活的波束扫描和猝发探测,因此不能采用时分复用的方式来截获目标,只能时域上连续侦察。

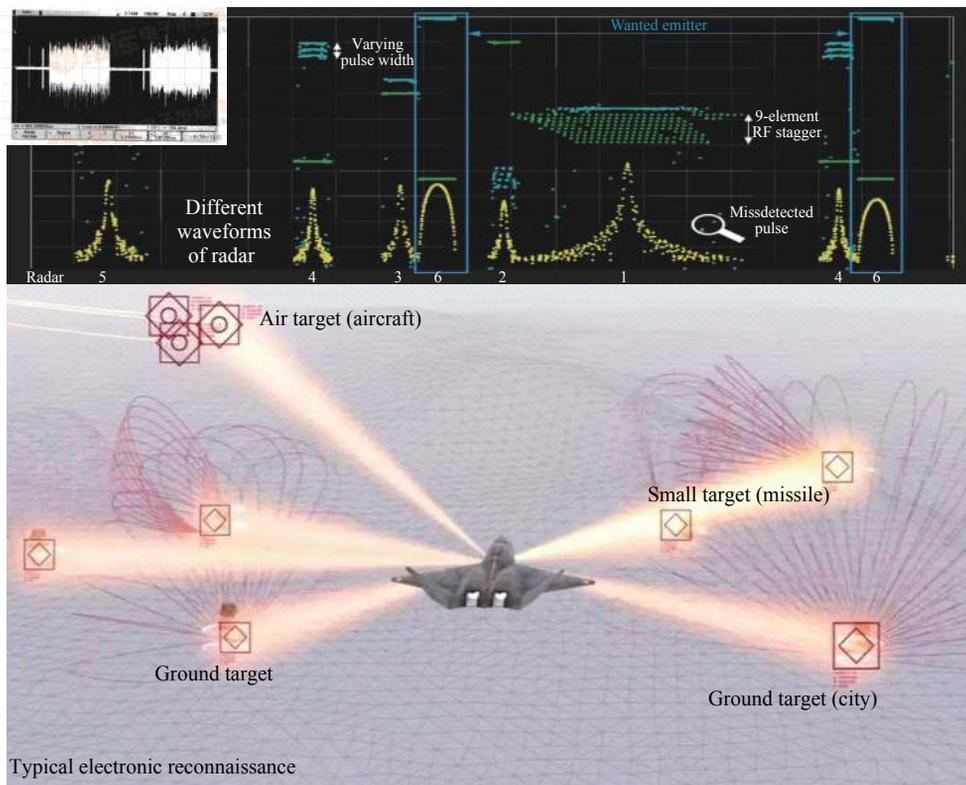


图 1 典型电子侦察场景示意图

Fig.1 Typical electronic reconnaissance

(4) 未知的功率: 不同辐射功率、不同距离和不同波长的雷达到电子战装备的功率密度本就差异很大, 而先进体制的现代雷达又具备了一定的功率控制能力, 可以在不同距离、不同扇区和探测不同目标时控制雷达的发射功率, 同时雷达可以通过幅相加权等方式改变主副瓣比, 甚至进行发射波束置零, 造成电子战装备难以预知雷达的功率强度。

(5) 未知的波形: 现代体制的雷达已普遍采用数字波形生成技术, 不仅脉冲间隔可以组变调整, 脉内也出现了越来越多的调制类型, 比如线性调频、频率分集、频率步进、相位编码等。而信号处理的最优匹配理论决定了对不同类型的波形最优匹配的信号模板是不同的, 因此电子战接收机往往会面临信号处理失配、灵敏度下降等困难。

由此可见, 从数学角度来讲电子战是一个在已知一定观测量和先验知识条件下对大量参数未知目标的信息反演问题。从信息论的角度来说, 对象数量越多、每个对象的描述参量越多、参量的可变范围越复杂, 反演的难度越大, 而且呈级数增长, 这成为了电子战最为根本的科学问题之一。

除了以上电子侦察固有的数学问题, 近年来随着雷达技术的不断进步, 新形态(如雷达网络)、新体制(如宽带调频、时空猝发、功率管理等)的威胁对象不断涌现, 进一步加重了电子战的目标观测和信息反演难度。例如, 有源相控阵雷达具备在时、空、频域的捷变特性和功率管理、抗干扰等措施, 越来越大的带宽和时带积, 不仅显著提高了雷达探测的分辨率和探测距离, 而且还造成了电子战装备效能的严重下降; 组网雷达通过多部雷达间的密切协同, 构成了层次分明、信息关联的雷达网络, 如台湾的地面雷达网(强网系统)和美国的航母战斗群, 在频段跨度、辐射波形、多发多收方面进一步降低了信号的截获概率和分选聚类特征。以上因素都进一步加重了电子战, 尤其是电子侦察的实施难度。

1.2 电子侦察的发现概率与影响因素

如上所述, 由于电子侦察是在时、空、频、能多域对信号的截获, 而这些域是正交的, 因此电子战的整体发现概率是时、空、频、能域发现概率的乘积, 如公式(1)所示:

$$P_{\text{系统}} = P_{\text{时}} \times P_{\text{空}} \times P_{\text{频}} \times P_{\text{能}} \quad (1)$$

在时域,如果信号是时间平稳的,那么通过时分扫描是可以的。然而新体制雷达通常都不是时域平稳的,甚至是时域猝发的;早期电子侦察机采用类似示波器的“采集-缓存-软件”的处理方式,时域截获概率会显著下降。因此,目前电子侦察接收机通常都是连续工作,可以认为时域的截获概率可以达到 100%。

在频域,随着跳频通信、捷变雷达、猝发探测等新体制辐射源的运用,信号在频域的平稳性不再成立,如果接收机仍然采用类似收音机的调谐模式,频域截获概率将大为降低。例如,如果跳频辐射源的跳频带宽达到 1 GHz,若电子侦察接收机的瞬时带宽只有 100 MHz,虽然对每个子带内的信号都可正常侦收和分析,但整个频域截获概率将只有 1/10。

在空域,如果是全向天线或者宽波束天线可以同时覆盖大空域,但往往天线增益低、系统灵敏度低、侦察距离近;如果采用抛物面等窄波束天线或者相控阵波束扫描的方式,灵敏度高、侦察距离远但通常波束带宽较窄。而除了自卫告警的大部分情况下,侦察距离远更为重要,窄波束是必然的选择,但此时必须得空域扫描,空域截获概率低,若波束宽度为 3°,那么对于前向 90°的空域其截获概率仅有 1/30。

在能量域,由于空间信道衰减的存在,雷达等辐射源达到电子侦察系统口面的信号很微弱。一般地,电子侦察对雷达信号的侦察方程可以由下式表示:

$$P_r = \left(\frac{P_t G_t}{4\pi R^2} \right) \left(\frac{\lambda^2 G_r}{4\pi} \right) \frac{1}{L_s} \quad (2)$$

式中: λ 表示雷达信号波长; R 为目标距离; $P_t G_t$ 为雷达等效辐射功率; G_r 为接收天线增益; L_s 为附加损耗,包括雷达波导损耗、天线极化损耗、大气衰减和接收馈线损耗等。可以将右式第一个括号理解为传播 R 距离后单位面积的雷达功率密度,它与电子战接收机无关;第二个括号理解为电子战接收机有效口面可以收集到的功率总和,它是电子战接收机的固有性质,与辐射源无关。换算为 dB 方式为:

$$P_r (\text{dBm}) = P_t G_t (\text{dBm}) - 20 \log \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right) + G_r (\text{dB}) - L_s (\text{dB}) \quad (3)$$

可以看到,即使对于主瓣发射功率 1 MW 的大型雷达,如果在 100 km 外侦察其副瓣(相对主瓣电平 -30 dB),接收机口面的功率密度仅有 -81 dBW/m²,以频率 10 GHz 的全向天线为例,进入接收机信道的能

量仅有 -120 dBW,非常微弱。相应地,如果电子侦察接收机的系统灵敏度为 -120 dBW,那么小于此灵敏度的信号(包括辐射功率小或者传播距离远)将无法侦察到,这就对应能量域的截获概率。理论上只有通过高增益天线和超外差接收机提高系统灵敏度和能量域截获概率,但高灵敏度往往需要窄波束、窄带宽和精细时频处理,恰恰对上述时空频域的宽开相矛盾。

由上述分析可知,若时空频不能同时宽开或者系统灵敏度不够高,则系统的截获概率将只有百分之几甚至更低,严重影响了对辐射源的发现,更无从谈起测量和识别,进而直接降低了电磁态势获取的全面性和及时性。因此,高灵敏度下的时、空、频多域的全面宽开和高灵敏度成为了电子战的核心问题,也是现有技术体制面临的核心挑战所在。正是由于以上技术困难,电子战迫切需要微波光子信号处理等新的技术手段来突破瓶颈限制,提高作战效能。

2 电子战中的微波光子学研究现状

早期电子战以采用射频电子技术为主,包括晶体视频接收机、瞬时测频接收机、超外差接收机等电子侦察技术,以及噪声干扰、瞄频干扰等干扰技术^[2]。这些技术直接在微波器件或射频电路上实现,相对简单但存在跨倍频程困难、带内一致性差、灵活性差等不足。这种情况不仅在电子战中出现,在雷达通信中也很普遍,比如绝大部分雷达的相对带宽(带宽和中心频率之比)小于 20%,即使舰载常用的双波段雷达也是采用 S、X 两个波段相对独立的孔径来实现。

进入新世纪以来数字化技术渐渐成为了主要途径^[3],但由于数字化必须依赖高速的 ADC、DAC 和 FPGA 等电子器件,并需要相对复杂的变频结构,长期以来的瞬时带宽、动态范围、功耗代价等相对较大,仍难以满足发展需求。以数字波束形成(DBF)为例,如果要实现带宽覆盖 2~18 GHz、动态范围优于 40 dB 的性能指标,要求电子器件至少达到采样率 ≥ 40 G/s 和有效位数 ≥ 8 bit,这意味着一个通道中将会产生 320 Gb/s 的数据量。如果以典型 64 个通道进行组阵,那么信号处理的数据总量将高达 20 Tb/s。如此高的数据量将会带来传输难、处理慢、功耗高、代价大等一系列问题,在航空、航天等典型平台下尤其很难实现,迫切需要寻求新的技术途径。

为了解决以上技术瓶颈,微波光子等新的技术体

制孕育而生。广义来讲,微波光子是一种将微波信号变换到光学域,通过光学手段完成微波信号的产生、传输、处理、控制等过程的交叉学科^[4-7]。其基本原理如图 2 所示,由于光波所处的频段很高(典型约 200 THz),与现阶段典型应用的微波频段相差至少 5 个数量级,在微波域上跨频段的宽带信号在光域上是个相对带宽仅有万分之一的窄带信号。正因如此,微波光子综合了微波和光子的技术优势,兼具了宽带性、高速性、并行性、小巧性等性能优势,成为了电子战装备的重要技术体制之一^[8]。值得注意的是,微波光子并非仅针对射频技术的升级改进,微波光子也可在融入数字技术的特征,最为典型的就可实现 ADC 功能的光电采样和可进行灵活处理的光子

计算。

目前,以微波光子处理为核心技术体制构建电子信息系统的可行性和先进性已经被充分证明。自 2000 年以来, DARPA 就开始有计划、成体系地开展微波光子系统研究项目,开展了“模拟光信号处理技术”(AOSP)、“超宽带射频收发组件”(ULTRA-T/R)、“多功能的微波光子信号处理器”(PHASER)、“高线性光子射频前端”(PHOR-FRONT)等重大技术研究项目,覆盖了微波光子系统组成的所有要素,包括信号产生、传输、处理、控制等方面。

澳大利亚空军和国防科学和技术组织(DSTO)成功将微波光子链路技术应用于 P-3C 猎户座海上巡逻机的 ALR-2001 型 ESM 设备中^[8]。图 3 是微波光子链

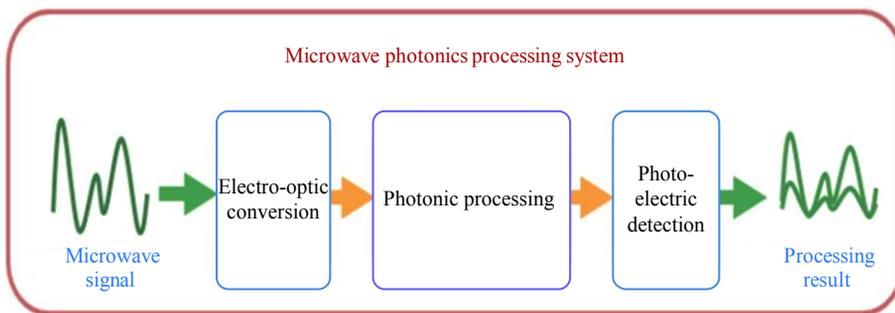


图 2 微波光子处理的基本原理

Fig.2 Principle of microwave photonics processing

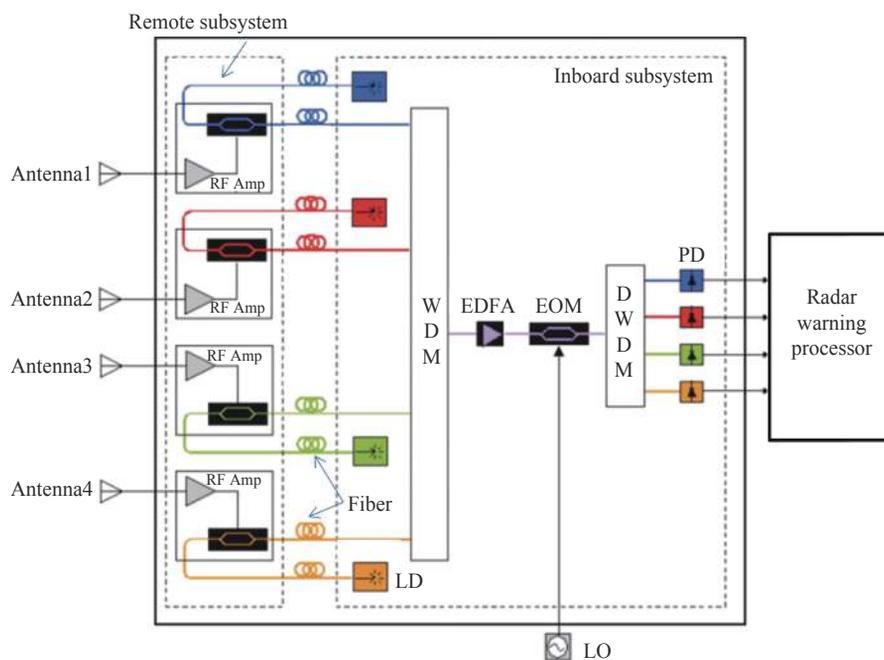


图 3 机载 ALR-2001 系统中的微波光子传输

Fig.3 Microwave photonics transmission in ALR-2001 system

路在 ALR-2001 系统中替代传统微波电缆的两种方案,一种是仅用于将前端与宽带接收机或窄带接收机之间的长微波电缆用微波光子链路替代,另一种是在天线之后使用微波光子链路进行宽带信号传输,而前端被后移到靠近接收机或者集成到接收机内部,甚至由于微波光子链路具有宽带信号的传输能力,用于划分多个子频段的前端可以被省略,进而有效的简化系统架构和提升综合性能。

2011 年 BAE 公司 EWOCS (Electronic Warfare Optically Controlled Subsystem) 项目报道了面向机载 ESM 应用的宽带光学多波束样机^[8],如图 4 所示。该系统主要包含两个部分:一部分是机翼上的 16 元天线阵列以及对应的电光转换前端,将接收到的微波信号转

换为 16 路并行的光载微波信号;另一部分是位于机舱中的光学波束网络分机,将接收到的 16 路并行光载微波信号进行延时加权,形成特定指向的同时多波束。这两个单元之间通过光缆进行连接,保证了信号传输的宽带性、高速性、低损耗和轻量化。该系统可以覆盖 6~18 GHz,实现了 4 GHz 的瞬时带宽,±20°瞬时空域覆盖,4 个同时波束,相邻波束的交叠深度为低于波峰 3~8 dB (低频端波束宽度大,交叠深度较浅;高频端波束宽度小,交叠深度较深),可实现大瞬时带宽、大空域覆盖和高精度比幅测向的电子侦察性能,并且其结构外形完全按照“阵风”战斗机的要求进行设计,已经初步具备安装在战机上的能力。

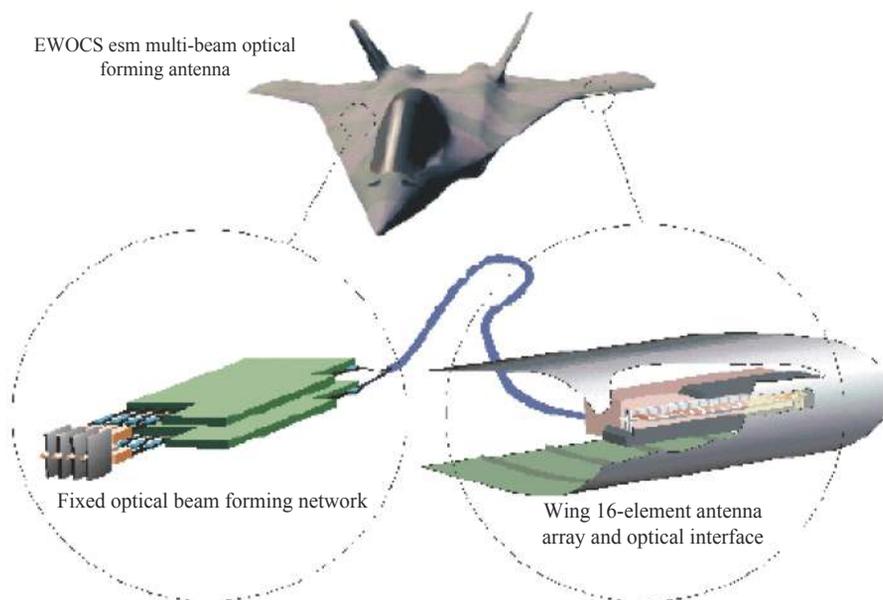


图 4 BAE 公司 EWOCS 项目的机载光学多波束样机

Fig.4 Optical multiple beamforming prototype of EWOCS project produced by BAE corporation

3 电子战中的微波光子技术典型应用

电子战中微波光子的典型应用很多,包括微波光子传输、分布式光子稳相、光子变频滤波、光学波束形成、光电采样等。以光学波束形成为例,由于光学波束形成采用真延迟技术,能够克服常规基于移相器的相控阵波束形成宽频歪头和渡越时间等问题。光学波束形成在雷达中也有大量应用,但电子战的需求更为迫切,这是因为和常规雷达主要采用 2 或 3 个合差波束不同,电子侦察通常需要大量的同时多波束以

同时满足大空域覆盖和高灵敏度的需求。

典型的光学波束形成方法包括基于二进制光开关延迟线的波束形成方法、基于色散的波束形成方法、基于空间傅里叶变换的波束形成等^[9],其本质都是在光上对各个单元天线的信号进行延时。光学波束形成基本原理和过程如图 5 所示。首先是天线阵列,通常针对工作频段和覆盖空域进行无栅瓣设计,此时天线单元之间的间距往往小于波长的二分之一。其次是电光互转换阵列,实现射频信号到光学域中的转换。由于电光和光电转换环节会引入噪声和

插入损耗,因此系统中需要前置微波放大器、滤波器、均衡器等相关组件;再者,波束形成网络是光学波束形成核心环节,主要是通过光延迟分配网络实现光域加权和波束形成的单元;此外,在光学波束形成中,无论是分路器、耦合器、延迟器都会引入一定的光损耗,所以系统中还要在合适位置处增加光放大进行功率补偿;而且通常每个通道存在一定的幅度、相位误差,或者出于控制波束形状的必要,还需增加波前控制单元对每个通道进行调控。

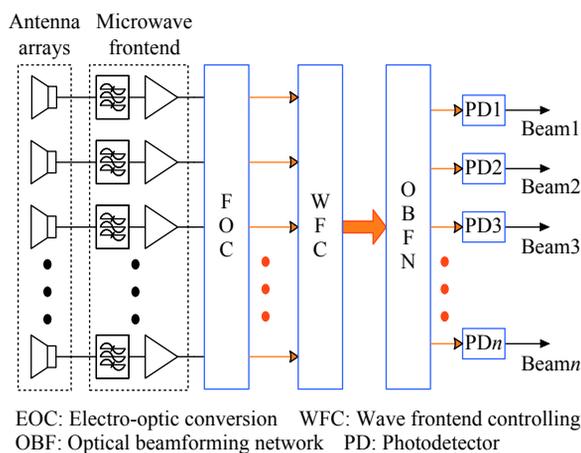


图 5 典型光学波束形成原理

Fig.5 Principle of typical optical beamforming

为了验证光学波束形成的能力,笔者所在课题组以 EWOCs 为参考,设计了宽带光学多波束形成的原理样机,并对其性能进行了测试和辐射式等效验证。其工作频段覆盖 6~18 GHz(主要受天线阵的频段覆盖能力影响),可支持的信号瞬时带宽达到 12 GHz,阵列规模为 16 元,合成增益理论值可以达到 12 dB。由于充分利用了光学并行性的处理优势,可以在规模较小的情况下实现大量同时波束。图 6 分别示出了在频率 6、10、18 GHz 处同时 18 个波束的测试效果。可以看到,系统可以同时实现宽频带和多波束,其中两旁波束的幅度略低于中心方向波束的幅度主要是受到单元天线方向图调制的影响。

为了考察光学波束是否克服了歪头效应,并考虑到实际应用中往往需要侦察来自同一方向的单个宽带信号(如成像雷达)或者多个同方位的窄带信号的情况,将其中一个波束方向上不同频率的波束形状绘制在一起,如图 7 所示。图中可以看到多个不同频率的波束其指向是高度一致的,这和相控阵在大角度上

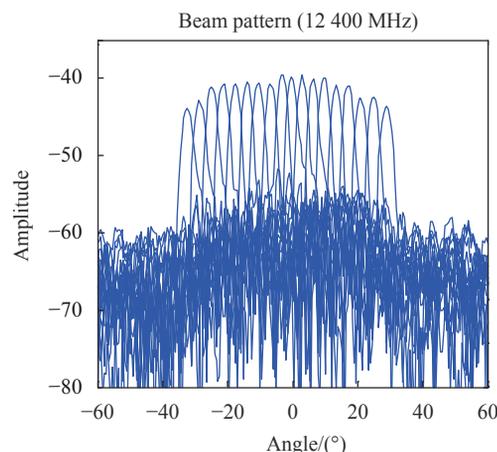
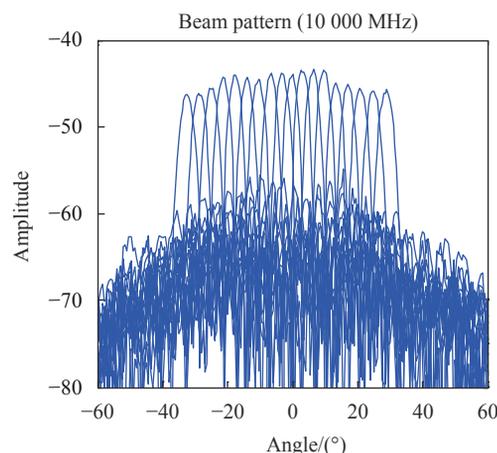
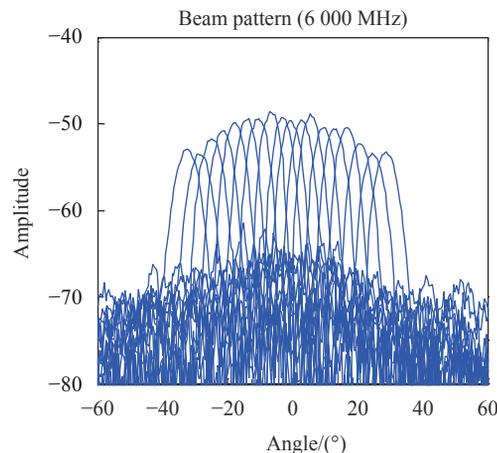


图 6 接收光学多波束方向图随频率变化

Fig.6 Beam patterns with different frequencies

波束指向不同有显著差异。这意味着在该方向上所有频段内的信号均获得了最大增强。同时可以看到,一是同一波束内不同频率的功率强度不同,这是因为辐射测试中不同频率信号的空间传输损耗不同;二是同一波束内不同频率的 3 dB 波束宽度不同,这是根据瑞利衍射定理,在天线孔径或阵列规模一定的情况,波束宽度(空间定向性)和频率成反比,虽然不影

响主波束内的信号接收,但会影响相邻波束的交叠深度和测向精度,可以通过幅相加权得到改善。正是由于光学波束形成的这种超宽带特征,可以大大提升对超宽带线性调频信号等特殊信号的侦察完整性和准确性,在笔者课题组之前的文章中已有分析^[10]。

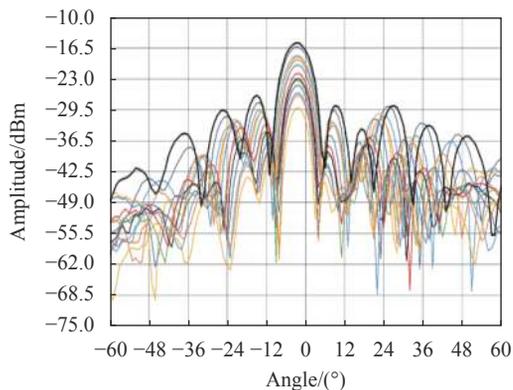


图 7 不同频率波束指向一致性的测试结果

Fig.7 Measured consistency of beams with different frequencies

光学波束形成除了提升了系统的瞬时带宽,相比相控阵和数字阵获得了更高的频率截获概率,同时也显著增强了信号功率。图 6 中的波束合成增益均达到 10~12 dB,意味着系统的侦察灵敏度也提升了相同量级。而按照公式 (1) 的侦察方程可知,灵敏度提升 6 dB,对同等辐射功率的对象探测距离将提升一倍。如果将其应用于图 4 所示的机载 ESM 系统中,在不考虑视距遮挡的情况下可以将对雷达的侦察距离提升 2.5~4 倍,毫无疑问这对作战的效能影响是非常巨大的。

4 发展趋势

当然,微波光子毕竟还属于发展期的新型交叉领域,技术体系还很不完备;为了更好适应电子战的发展需求并向电磁频谱战迈进,无论是微波光子处理技术还是元器件技术,均需要更多的跨越式发展:

首先,微波光子处理技术的内容应更为丰富,由微波光子实现的功能也需要更多样化和复杂化。比如电子战中常见的收发隔离问题,已有文献报道采用特殊结构的微波光子调制器来实现比普通微波环形器更高的隔离度和宽带性^[11];而微波光子变频可以很好地实现多个信号的同时变频,并提供更好的镜像抑

制和串扰抑制能力^[12]。除此之外,微波光子也展示了巨大的信号处理潜力,MIT 已经证实了通过光子神经网络可以在求解偏微分方程等典型案例中获得比电子手段高 1 980 倍的处理速度^[13]。实际上,光的空域并行能力尚未得到充分利用,否则光的计算能力还将呈数个量级的提升。

其次,微波光子技术的工作频段和瞬时带宽还需扩大。宽带是微波光子的核心技术优势之一,以典型光波长 1 550 nm 波段为例,其载波频率高达 195 THz,即使发挥出千分之一的相对带宽,也可达到约 200 GHz,但现有的器件还很难支持如此高的频率,尤其是电光调制器的商用化带宽水平尚在 40 GHz 左右、实验室水平也仅有 65 GHz^[14]。同时,目前微波光子器件仍以分离的个体器件或小规模的多通道组件为主,集成度远远落后于微波电路和微电子器件的水平,限制了其在大规模阵列和小平台中的应用^[15]。

最后,雷达、通信等对象的发展也为微波光子电子战技术提出了更高要求,尤其是微波光子雷达的发展为微波光子电子战进一步发展提供了参考。2014 年 Nature 首次报道微波光子雷达^[16]之后,S/X 微波光子双波段雷达^[17]、高分辨光子成像雷达^[18]等得到了快速发展。这些微波光子雷达要么是利用光的宽带性实现超宽带和多频段的微波信号产生与接收,要么是利用光的超宽带特性产生高质量和稳定的调频信号,中间都采用了大量的微波光子手段。显而易见,微波光子电子战如何应对微波光子雷达的挑战将是另一个重要的问题,比如是继续用多个频综产生复杂和可变的倍频程干扰信号,还是用光梳和光谱调控的方法产生?

综上所述,微波光子由于充分发挥了光的宽带性等优势,能够显著提升电子战装备的时空频宽开能力,并通过阵列处理有效解决灵敏度和空域覆盖的矛盾,大大提升了电子侦察对未知电子目标的发现能力,具有重要的意义。但微波光子技术体系远远未到成熟的地步,尚需在处理方法的多样性、器件性能和应用范围的广阔性上继续深化。可以期待,随着电子战装备的升级换代以及电磁频谱战日益成熟对微波光子技术的需求越来越多,未来十年电子战中的微波光子技术必将迈上一个新台阶。

参考文献:

- [1] David A. Principle and application of Electronic Warfare[M]. Beijing: House of Electronics Industry, 2011.
- [2] David L Adamy. Electronic Warfare: EW101[M]. Beijing: House of Electronics Industry, 2009.
- [3] Han S, Chen L, Xu Z, et al. Large-scale antenna systems with hybrid analog and digital beam forming for millimeter wave 5G [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2015, 53(1): 186-194.
- [4] Yao J P. Microwave photonics [J]. *J Lightwave Technol*, 2009, 27(3): 314-355.
- [5] Chen Z Y, Zhou T, Zhong X, et al. Stable downlinks for wideband radio frequencies in distributed noncooperative system [J]. *IEEE J Lightw Technol*, 2018, 36(19): 4514-4518.
- [6] Chen Z Y, Yan L S, Pan Y, et al. Use of polarization freedom beyond polarization-division multiplexing to support high-speed and spectral-efficient data transmission [J]. *Light: Science & Applications*, 2017, 6: e16207.
- [7] Chen Z Y, Yan L S, Pan W, et al. SFDR enhancement in analog photonic links by simultaneous compensation for dispersion and nonlinearity [J]. *Optical Express*, 2013, 21(17): 20999-21009.
- [8] Pan S L, Zhang Y M. Key technologies and microwave photonics radar [J]. *Science & Technology Review*, 2017, 35(20): 36-52.
- [9] Ye X W, Zhang F Z, Pan S L. Compact optical true time delay beam former for a 2D phased array antenna using tunable dispersive elements [J]. *Optics Lett*, 2016, 41(17): 3956-3959.
- [10] Zhou T, Fan B H, Chen J X. Analysis of transmission characteristics of UWB signal using optical beam forming [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2010, 31(3): 451-455.
- [11] Doerr C R, Chen L, Vermeulen D. Silicon photonics broadband modulation-based isolator [J]. *Optics Express*, 2014, 22(4): 4493-4498.
- [12] Li P X, Pan W, Zou X H, et al. Image-free microwave photonic down-conversion approach for fiber-optic antenna remoting [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2015, 52(1): 1-16.
- [13] Shen Y C, Harris N C, Skirlo S, et al. Deep learning with coherent nanophotonic circuits [J]. *Nature Photonics*, 2017, 11: 441-446.
- [14] He M B, Xu M Y, Ren Y X, et al. High-performance hybrid silicon and lithium niobate Mach-Zehnder modulators for 100 Gbit s⁻¹ and beyond [J]. *Nature Photonics*, 2019, 13: 359-364.
- [15] Chen Z Y, Gu J, Zhou T, et al. Technology progress and development trend of integrated microwave photonics in broadband information systems [J]. *Vacuum Electronics*, 2019(4): 1-5.
- [16] Ghelfi P, Laghezza F, Scotti F, et al. A fully photonics-based coherent radar system [J]. *Nature*, 2014, 507: 341-345.
- [17] Ghelfi P, Laghezza F, Scotti F, et al. Photonics for radars operating on multiple coherent bands [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(2): 500-507.
- [18] Zhang F, Guo Q, Wang Z, et al. Photonics-based broadband radar for high-resolution and real-time inverse synthetic aperture imaging [J]. *Optics Express*, 2017, 25(14): 16274-16281.