

引用格式:胡以华,董骁. 光电侦察技术发展现状与趋势[J]. 信息对抗技术, 2023, 2(4/5):53-69. [HU Yihua, DONG Xiao. The development status and trend of electro-optical reconnaissance technology[J]. Information Countermeasure Technology, 2023, 2(4/5):53-69. (in Chinese)]

光电侦察技术发展现状与趋势

胡以华^{1,2,3,4}, 董骁^{1,2,3,4*}

- (1. 国防科技大学电子对抗学院, 安徽合肥 230037; 2. 脉冲功率激光技术国家重点实验室, 安徽合肥 230037;
3. 先进激光技术安徽省实验室, 安徽合肥 230037; 4. 电子制约技术安徽省重点实验室, 安徽合肥 230037)

摘要 随着光场多维度调控、高灵敏度光电探测和新型材料等技术的进步,传统光电侦察系统的信息获取能力有了长足进步,但在日益智能和复杂的信息域作战中仍需提升探测精度、信息获取维度和可靠性。分析了光场的多维物理量在光电侦察中的作用机理;总结了光电侦察中光场调控的发展现状,归纳了振幅、传输方向、频率、相位和相干性等物理量的调控能力,分析了典型光电器件在光场调控中的作用;综述了光电侦察技术的发展现状,总结了光电侦察面临的挑战。最后,对光电侦察在人工智能赋能、集成化、全光波段动态侦察和主动多光谱探测模式等方面的发展趋势进行了展望。

关键词 光电侦察;光电对抗;光场调控;激光对抗;光学隐身

中图分类号 TN 2 **文章编号** 2097-163X(2023)04/05-0053-18

文献标志码 A **DOI** 10.12399/j.issn.2097-163x.2023.04-05.004

The development status and trend of electro-optical reconnaissance technology

HU Yihua^{1,2,3,4}, DONG Xiao^{1,2,3,4*}

- (1. College of Electronic Engineering, National University of Defense Technology, Hefei 230037, China;
2. State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Hefei 230037, China;
3. Advanced Laser Technology Laboratory of Anhui Province, Hefei 230037, China;
4. Key Laboratory of Electronic Restriction Technology of Anhui Province, Hefei 230037, China)

Abstract With the development of multi-dimensional light field modulation, high-sensitivity electro-optical detection and new materials technologies, the information acquisition capabilities of traditional electro-optical reconnaissance (EOR) systems have made significant progress. However, the EOR systems still face new challenges including the detection accuracy, information acquisition dimensions, and reliability in the increasingly intelligent and complex information-domain operations. In this paper, the function mechanisms of the multi-dimensional physical quantities of light field were analyzed in EOR operations. The light field modulation developments and capabilities were studied including the amplitude, transmission direction, frequency, phase, and coherence. The important role of typical optical devices were introduced in the light field modulation. The EOR technology development status was

收稿日期:2023-06-30

修回日期:2023-07-31

通信作者:董骁, E-mail: skl_dongxiao@163.com

基金项目:国家自然科学基金资助项目(62201597);国防科技大学自主创新科学基金资助项目(22-ZZCX-007);国防科技大学科研计划项目(ZK22-35)

analyzed, and bottleneck issues were summarized. Finally, development trends of EOR were prospected consisting of artificial intelligence empowerment, integration, all optical-band dynamic EOR and active multispectral detection modes.

Keywords EOR; electro-optical countermeasure; light field control; laser countermeasure; optical stealth

0 引言

光电对抗是电子对抗在光波段的具体实现形式,追求战场信息的单向透明,具有精度高、抗电磁干扰能力强、隐蔽性好等特点,被广泛应用于光电目标精确侦察、平台自卫与重要目标末端防护等方面。光电侦察是光电对抗的核心组成部分和实施光电干扰的重要保障,其探测对象主要是激光制导、成像制导、复合制导等精确制导武器和光电观测设备等。光电器件水平和信息处理能力的进步使得以激光雷达^[1]为代表的主动光电侦察技术得到迅猛发展,并且天地立体的多手段、多波段侦察监视能力使战场呈现出空前“透明化”。但随着人工智能(AI)、宽波段干扰^[2]、宽波段隐身^[3]和激光武器等技术的日益突破,无人化、集群化、智能化和网络化武器逐渐成熟,传统的光电侦察手段在威胁源多维信息可靠获取方面面临巨大挑战。如何提升光电侦察在高精度、多维度和高时效等方面的性能并满足日益智能和复杂的信息域作战需求亟待深入研究。

针对复杂电磁环境中高性能光电侦察应用的瓶颈,光电侦察研究应从作为对抗媒介的光场出发,分析光电侦察中物理域到信息域的映射规律,研究光场调控对光电侦察信息获取的影响机理,探索动态高效的光电侦察实现方法,提高光电侦察效能。光场的本质是光的物理属性在空间和时间维度上的分布特性,具体可划分为物理维度集、空间维度集和时间维度集。物理维度集包含强度、相位、光谱、偏振、相干度等;空间维度集包含光场的空间分布特性;时间维度集指光场的时间演变特性。光场丰富的自由度为光电侦察提供了多维信息利用维度。立足于当前激光技术和光场信息获取能力,本文研究了光电侦察机理的表征方法,归纳了光电对抗中光场的调控方法和调控能力,总结了光电侦察技术的发展现状和面临的挑战,并对光电侦察技术的发展趋势进行了展望。

1 光电侦察机理表征

1.1 光电侦察信号表征

在光电对抗中,由于对抗范围的立体性、对抗手段的多样性和对抗环境的复杂性等影响,仅用机器视觉的7维全光函数 $L(x, y, z, \theta, \varphi, \lambda, t)$ ^[4]表征几何光线的三维位置、方位角、俯仰角、波长和时域已不能完全描述实际对抗中的多维光场,还应扩充振幅、偏振、相位、相干度等维度。但光电探测器的“平方率”特性使光电探测响应光强无法直接测量光振幅,传统光电侦察仅利用了有限维信息。研究光场多维物理量的信息复用机制将改善光电侦察的性能,如提升光电侦察范围、成像分辨率和探测概率等。

主动光电侦察的主要内容是激光侦察。光电被动告警的信号探测过程与光电主动侦察回波信号的探测过程有一定相似性。不失一般性,可将发射的探测光束表示为阵列光束形式,从而将单光束探测拓展为多光束成像,提升信息获取维度。使用单光束对特定空域扫描也可等效为分时工作的阵列光束。矩形阵列光场在初始平面 $z=0$ 的分布可表示为:

$$u_0(x, y, 0, t) = \sum_{m=-M}^M \sum_{n=-N}^N u_{mn}(t) \cdot \exp\left[-\frac{(x - mx_d)^2 + (y - ny_d)^2}{\omega_0^2}\right] \exp(j\varphi_{mn}) \quad (1)$$

式中, $u_{mn}(t)$ 为各子光束的振幅,可表示脉冲光或强度编码光束,如Golay码调制、正弦波调制、线性调频调制等^[5]; ω_0 为子光束光斑半径;阵列光束维度为 $(2M+1) \times (2N+1)$, x_d 和 y_d 分别为光束在 x 、 y 方向的间距; φ_{mn} 是子光束与传输方向相关的附加相位,当 $\varphi_{mn}=0$ 时,式(1)即为传输方向一致的阵列光束。

基于Huygens-Fresnel原理^[6],波长为 λ 的阵列激光沿 z 轴正向传输,从发射光学系统入射到位于 $z=L$ 的目标平面上的光场可表示为:

$$E_i(\lambda, \boldsymbol{\rho}, L, t) = \frac{-j \exp(jkL)}{\lambda L} \iint u_0(\boldsymbol{s}, 0, t) \cdot \exp \left[\frac{jk(\boldsymbol{\rho} - \boldsymbol{s})^2}{2L} + \varphi(\lambda, \boldsymbol{s}, \boldsymbol{\rho}, L) \right] d^2 \boldsymbol{s} \quad (2)$$

式中, $\boldsymbol{\rho} = (\rho_x, \rho_y)$ 是接收平面 $z = L$ 上任意一点, $\boldsymbol{s} = (x, y)$ 是发射平面 $z = 0$ 上的二维矢量, 波数 $k = 2\pi/\lambda$, $u_0(\boldsymbol{s}, 0, t)$ 表示光场的时域和空域特性, $\varphi(\lambda, \boldsymbol{s}, \boldsymbol{\rho}, L)$ 是球面波从发射平面到接收平面由大气湍流引入的复随机相位扰动, 与 λ 密切相关。目标平面处的光强可表示为:

$$I(\lambda, \boldsymbol{\rho}, L, t) = \langle E_i(\lambda, \boldsymbol{\rho}, L, t) E_i^*(\lambda, \boldsymbol{\rho}, L, t) \rangle \quad (3)$$

式中, $\langle \cdot \rangle$ 为系综平均。

考虑到光电无源干扰, 传输路径上存在动态消光现象, 在目标平面处, 发射激光的光强分布可表示为:

$$I_0(\lambda, \boldsymbol{\rho}, L, t) = I(\lambda, \boldsymbol{\rho}, L, t) \cdot \exp \left[\int_0^L -\alpha(\lambda, t) \beta_c(r) dr \right] \quad (4)$$

式中, $\alpha(\lambda, t)$ 是烟幕的动态消光系数, 由于烟幕等无源干扰在三维空间有一定形状分布, 其对光束的消光与空间位置有关, $\beta_c(r)$ 是积分路径上各光束与烟幕的重叠系数, 当完全重叠时, $\beta_c(r) = 1$ 。

可见, 式(4)中 $I_0(\lambda, \boldsymbol{\rho}, L, t)$ 综合表征了光场强度的空间分布特性、动态衰减特性、光谱特性、脉冲编码等时域特性, 但光场的相干特性、矢量特性和频域特性仍需进一步深化表征。为简化分析, 以式(1)阵列光束中的中心光束 ($m = n = 0$) 为例, 分析光场的相干特性、矢量特性与频域特性的利用可行性。外差探测体制能同时获取多维物理量, 且灵敏度高, 本文以该探测体制为例展开分析, 中频信号可表示为:

$$i_{IF}(t) = \alpha \rho_1 \rho_2 A_s(I_0, t, \rho_0) A_L(t) \cdot \cos [(\omega_s - \omega_L)t + \varphi(t) - \varphi_L] + n(t) \quad (5)$$

式中, α 是光电探测器的响应度, ρ_1 是信号光和本振光的混频效率, 表征了二者相干性匹配程度^[6]; ρ_2 表示光场偏振特性的匹配程度, 通过多个偏振通道, 可分析回波的偏振特性, 为目标识别提供支撑; $A_s(I_0, t, \rho_0)$ 为信号回波光时变的振幅, 其与 $I_0(\lambda, \boldsymbol{\rho}, L, t)$ 密切相关, 可通过激光雷达方程得到目标的回波功率或回波光子数^[6], 其大小与

目标的反射率 ρ_0 成正比; 本振光振幅 $A_L(t)$ 通常为恒定值; ω_s 和 ω_L 分别是回波的角频率, ω_s 包含了目标的运动特征, 其也可采用线性调频信号调制, 实现目标速度、距离同时获取^[5]; $\varphi(t)$ 是激光回波时变相位, 携带了目标的微动信息^[7], 也可用于合成孔径激光雷达重构^[8]; $n(t)$ 是探测噪声, 包含环境背景噪声和探测系统受到的有源干扰; φ_L 是本振光相位。

1.2 光电侦察过程分析

式(4)和式(5)综合表征了光电主动侦察的典型过程, 为实现动态高效的光电侦察, 需要克服多种干扰因素, 通过对其中包含的多维物理量进行调控和信息解调, 将提升光电对抗的性能。比如: 通过阵列光束以及 $u_{mn}(t)$ 、 ω_s 、 $\varphi(t)$ 的多维度调制, 可提升激光雷达侦察的成像空域范围和精度, 并可实现速度、微动、距离等信息的同时获取; 通过对 $\alpha(\lambda, t) \cdot \beta_c(r)$ 的调控可分析光电无源干扰的光谱范围、干扰区域和作用时间; 通过控制 $n(t)$ 的幅值和编码特性研究, 可提升光电侦察系统抗有源干扰的效果, 保障系统的信息获取能力, 当 $n(t)$ 足够强时 (如光电探测器受到致盲干扰), 式(5)中的 α 趋向于 0, 探测系统无法实现光电转换。当目标采用遮蔽、隐身等措施时, ρ_0 减小, 则 $A_s(I_0, t, \rho_0)$ 值减小, 将削弱光电侦察效果。

2 光电侦察中光场调控发展现状

光电侦察的本质是利用光场的能量域、时域、频域和空域等自由度对信息进行额外调制, 保证己方信息获取的可靠性, 对光场的偏振、振幅和相位等物理维度进行单一或联合调控, 可产生具有特定分布的结构光场^[9]提升光电侦察效能, 如强散射环境下成像等^[10]。在光电侦察中, 对激光的调控是光场调控的重要方面。矢量光学、部分相干光、混沌光学等新型光束理论和计算成像技术的发展, 促进了光电侦察的精度和抗干扰能力的提升。

2.1 光场偏振特性调控能力发展现状

光的偏振特性表示电场矢量振动方向相对于波矢的偏向性, 按偏振度值可分为完全偏振光、部分偏振光和完全非偏振光; 按偏振分布特性可分为标量偏振光和矢量偏振光。标量偏振光横截面上的偏振方向相同, 如偏振光、部分偏振光、太阳光以及在激光测距和激光引信等领域

广泛应用的光束^[11],这类光束可用 $\lambda/4$ 波片、 $\lambda/2$ 波片、偏振分束器等实现偏振态调控和分离^[12]。标量偏振光的典型应用是偏振成像技术,其利用偏振度和偏振角等特性区分目标和背景,提高了复杂背景中的目标检测效果。

矢量光束横截面上的偏振态随空间位置存在非均匀变化,对光的衍射、时空演化和聚焦特性有重要影响,可实现超分辨成像。典型光束为具有空间堆成结构的柱矢量光束(CVB),其具有偏振涡旋结构,已在高速运动传感领域取得应用^[13],可分解为径向矢量光束和角向矢量光束。CVB主要有腔内转换和腔外转换2类产生方式,腔内转换法通过改变激光器谐振腔结构或加入特定器件,经过泵浦光作用直接生成CVB,光束质量和能量转化效率都较高,但激光器谐振腔空间受限且搭建复杂;腔外转换法利用相位或偏振器件,将标量偏振光束转换为CVB,常用器件有各向异性晶体^[14]、特殊结构的相位板^[15]、空间光调制器^[16]、光栅等衍射光学元件^[17]、超表面^[18]、级联涡旋半波片^[19]等,该方法面临成本、转化效率和光路设计等方面的问题,采用简单光路实现阶数可调的CVB在低成本和应用灵活性上有明显优势,是重要的发展方向。

2.2 光场传输方向调控能力发展现状

高精度、快速的光束方向偏转与控制在动态光电对抗中意义重大,激光三维成像、合成孔径激光成像等都对光束指向精度提出了较高的要求。当前,调控光场方向的方法主要包括:机械式光束偏转^[20]、声光偏转^[21]、液晶调制偏转^[22]和电光偏转^[23-24]等。机械式光束偏转利用惯性部件,存在响应速度较慢、精度较低、稳定性差等问题,光束偏转技术逐渐向微机电系统(MEMS)和光学相控阵(OPA)等全固态方向发展^[25]。

MEMS微镜易于小型化和集成化,且功耗较低、分辨率高、响应速度快,其微镜通常在数mm量级,有电磁驱动、压电驱动、静电驱动等典型控制方式。电磁驱动响应速度快,体积小且功耗低,但易受电磁干扰;压电驱动更易集成且线性度较好,但扫描角度范围小;静电驱动能在大位移状态下实现高精度的位置控制,典型二维MEMS微镜的扫描范围超过 $\pm 5^\circ$,角分辨率 $10\ \mu\text{rad}$,谐振频率超过 $3\ \text{kHz}$ 。

OPA技术通过调控阵列中不同通道光场的

相位实现光束偏转,典型方法有液晶调控^[26]、光波导调控^[27]和MEMS高对比度光栅结构^[28]等,三者典型的扫描范围分别为 82° 、 51° 和 2° ,相对应的光束偏振速度可达 5 、 100 、 $632\ \text{kHz}$ 。液晶光学相控阵速度偏低,但扫描角度最大;光波导结构在扫描角度和扫描范围上具有较好性能;MEMS光学相控阵具有最快的扫描速度,适宜于小角度高速扫描探测领域,且系统稳定、功耗低。OPA的主要设备是电光晶体(如 LiTaO_3)、电光陶瓷(如PLZT陶瓷)、半导体波导(如 AlGaAs)、液晶材料和光纤光学器件等。2013年,美国国防部高级研究计划局(DARPA)实现了大规模的二维纳米光学相控阵,验证了二维OPA技术在先进激光雷达应用的可能性, 64×64 元纳米天线集成在一块硅芯片上,器件尺寸仅 $576\ \mu\text{m}\times 576\ \mu\text{m}$ ^[29]。2016年,POULTON等^[30]采用分组三级级联移相器的方式来补偿相位噪声,设计出了小光束宽度、大转向范围的OPA系统,包含50个光栅天线,这是迄今报道的最大规模的一维光相控阵列,器件尺寸 $1\ 200\ \mu\text{m}\times 200\ \mu\text{m}$,光束宽度 $0.85^\circ\times 0.18^\circ$,波长在 $1\ 454\sim 1\ 641\ \text{nm}$ 调谐时,扫描范围可达 $46^\circ\times 36^\circ$ 。

2.3 光场振幅和相位调控能力发展现状

在光场的振幅、频率和相位等一维物理量的调控中,铌酸锂晶体(LN)发挥了重要作用,是当前研究热点。由于LN器件体积小、带宽高且半波电压低,支撑了调频连续波技术和微波光子学等发展,特别是LN薄膜技术在调制带宽和调制速度方面优势明显,促进了光电侦察能力的提升。随着光波导技术的进步,LN薄膜实现了波导折射率差 $\Delta n > 0.7$,增强了波导对光的限制能力,减小了调制器的体积和调制电压,利用LN薄膜可制备调制带宽 $> 100\ \text{GHz}$ 、半波电压与长度乘积 $V_\pi L < 2\ \text{V}\cdot\text{m}$ 的调制器^[31]。调制器的光场调控特性和典型结构如图1所示,主要分为相位调制和强度调制,信号样式分别见图1(a)~(c);典型的调制器主要有相位调制器(PM)、马赫曾德干涉调制器(MZM)、迈克尔逊干涉调制器(MIM)、微环调制器(MRM)、光子晶体谐振腔调制器(PHCM),各调制器结构见图1(d)~(h)。MZM与MIN的强度调制特性见图1(b),MRM和PHCM的强度调制特性见图1(c)。

在光学损耗方面,新的双锥形耦合工艺将基

于绝缘体上铌酸锂结构的干涉类调制器整体光学损耗减小到 3 dB^[33]。在消光比方面,谐振腔调制器的消光比由谐振腔的无源光谱响应决定,体现了调制的“纯净度”,MZM 虽未实现理想对称结构,但消光比仍较大,通常优于 30 dB^[34],对于高消光比应用场合,需要多个调制器级联。在调

制带宽方面,MZM 强度调制器的带宽优于 100 GHz,可达 420 GHz^[35],PM 调制器带宽一般为 30 GHz^[36]。调制速率体现了信息的加载速度,当前 MZM 的调制速率可达 100~320 Gbit/s^[37-38],对于更高调制速率,可由多个 MZM 调制器级联,各调制器做好信号同步。

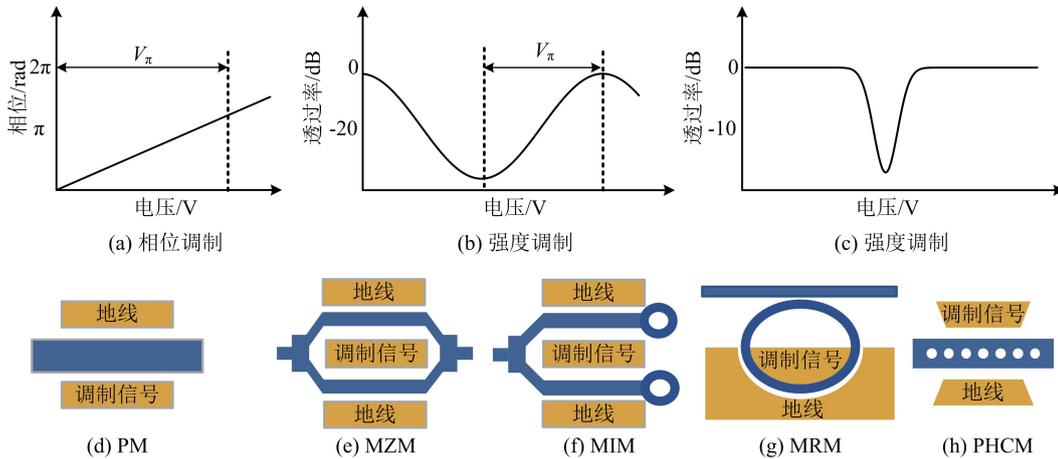


图 1 调制器输出端口光场图^[32]

Fig. 1 The diagram of output port and the light field of modulator

除了利用电光调制来实现光幅度调控外,LN 薄膜(TFLN)也是重要的声光调制器件。悬浮 TFLN 构建的声谐振器微波调制频率可达 4.5 GHz^[39],基于 TFLN 的无刻蚀声光调制器调制频率可超过 4 GHz^[40]。声光强度调制的带宽远低于 LN 电光调制带宽。此外,液晶相兼具液体的连续性、流动性和晶体的各向异性,展现出典型的光学和电学各向异性、灵敏的多元外场(如力、热、光、电、磁)响应特性,且液晶具有多样的自组装能力,能形成丰富的多层级超结构,为光场调控提供了较多自由度^[41]。应用中,可将多种调控方式优化整合,实现光场更高维度、更高消光比和更快速率的调控。

2.4 光场相干性调控能力发展现状

相干结构作为光束的二阶统计参量是部分相干光束的一个独有自由度,利用光场调控实现光学信息传输与恢复一直是光电探测系统的研究热点^[42]。单色点光源是理想的相干光源,其空间无穷小且谱宽无限窄,具有完全相干性;实际光源由于自发辐射、光源尺寸等,仅具有有限的线宽和横向相干度,表现为部分相干性^[6]。高相干性激光在湍流大气等复杂光电对抗环境中存在波前畸变、光束漂移及闪烁等负面效应^[43-44],会影

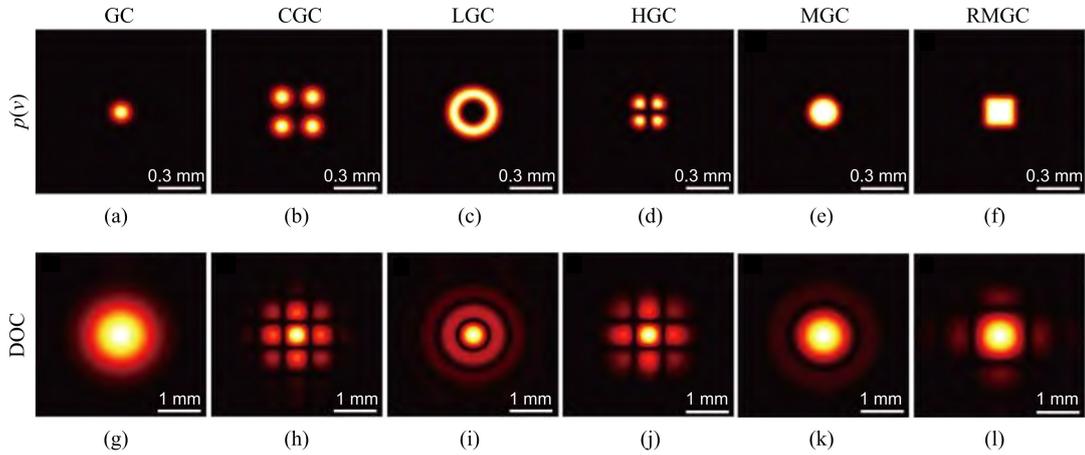
响光电探测和有源干扰效果,需要额外的补偿措施^[45]。因此,研究如何调控激光光束特性克服其负面效应并满足实际光电对抗需求十分必要。

部分相干光束具有抗湍流负面效应、超强自修复能力以及克服散斑噪声等独特优势^[46],可提高光电侦察质量。激光的空间相干性可表征为相干度(DOC)与空间相干结构两方面^[47]。利用权重函数 $\rho(v)$ 可设计光场的空间相干结构,并产生多种相干性光束(如图 2 所示^[48]),当 $\rho(v)$ 满足高斯分布形式时,所产生的部分相关光束为传统高斯关联(GC)谢尔模光束,其权重函数和相干度分布分别见图 2(a)和图 2(g)。当 $\rho(v)$ 分布不满足高斯分布形式时,所产生的光束被称为特殊关联结构部分相干光束,如余弦高斯关联(CGC)谢尔模光束、拉盖尔高斯关联(LGC)谢尔模光束、厄米高斯关联(HGC)谢尔模光束、圆对称关联(MGC)及矩形对称多高斯关联(RMGC)谢尔模光束等,其权重函数的空间分布见图 2(b)~(f),对应的空间相干度的空间分布见图 2(h)~(l)。

此外,介电超构表面通常由高折射率、高非线性系数的介质或半导体材料(如 Si、GaAs、TiO₂ 等)构成,其具有亚波长微结构和独特的二维分布特性,是光场调控的重要发展方向,可实

现时间和空间相干性调控,不仅能改变光的光谱响应特性,还可通过微结构排列的无序度生成具有独特空间相干性的光场。2021年,哈佛大学利用静态超表面实现了光场的多维调控,如图3所示^[9]。光典型的自由度包括入射角、偏振态、相

位、波长和强度等,基于超表面与光的复杂相互作用,从超表面的输入端改变光场的自由度参数,在输出端可获得不同的光模式,而其他传统的波前整形平台通常无法复制这种相互作用。



(a)~(f) 分别为GC、CGC、LGC、HGC、MGC、RMGC光束的权重函数的空间分布;
(g)~(l) 分别为GC、CGC、LGC、HGC、MGC、RMGC光束相干度的空间分布。

图2 基于非相干光源到部分相干光源的新型结构光

Fig. 2 New structured light generated by transforming the incoherent light source to partially coherent light source

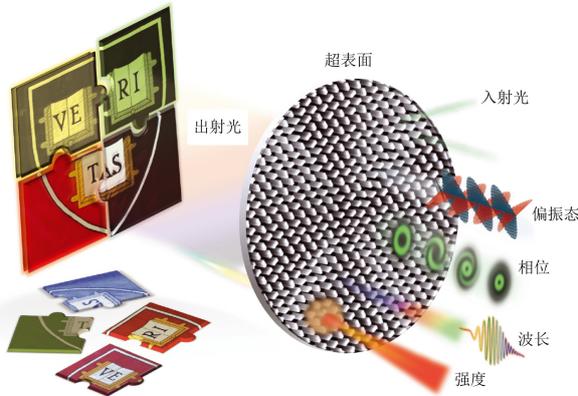


图3 基于超表面的结构光调控示意图

Fig. 3 Diagram of the control of structured light based on super surface

3 光电侦察技术发展现状

光电侦察分为主动侦察和被动侦察,光电主动侦察具有较好的全天时工作、抗干扰和多维信息获取能力,是光电侦察技术的研究热点,在探测范围和分辨率等方面有了长足进步;光电被动侦察主要是红外告警、紫外告警和激光告警,技术相对成熟,在装备型号上有一定发展。

3.1 光电主动侦察技术

光电主动侦察主要涉及主动红外侦察、激光

雷达侦察和激光测距等。主动红外侦察主要利用光场的强度信息和空域信息,采用“探照灯”模式工作,探测距离一般较近。激光雷达能利用光场多个自由度信息实现目标多维信息的感知,是当前研究的重点和热点,如利用时域信息和空域信息的激光三维成像和激光反射层析成像,利用时域、偏振和空域信息的偏振三维成像,利用光场相干性的合成孔径激光雷达成像,利用光场时域和强度特征的“猫眼”目标探测等。此外,OPA固态激光雷达在探测视场和转向精度方面性能优良,视场角可达 180° ,光束发散角优于 1.4 mrad ,是重要发展方向;单光子探测器及面阵探测器的进步有力地支撑了高灵敏度探测,促进了远程激光三维成像技术发展,增强了激光雷达穿透雾霾和烟雾等大气遮蔽物进行高精度三维成像的能力。除了“所见即所得”的经典成像模式外,基于探测与计算重构的激光成像方式在远程超分辨成像中潜力较大。激光反射层析成像技术是一种通过不同角度下激光在物体深度方向的一维时间流信号积分重建目标二维轮廓图像的远距离成像技术,是最接近实用化的超分辨成像技术之一;合成孔径激光雷达的成像分辨

率与距离无关,是天基目标侦察的重要手段。当前光电主动侦察的典型进展见表 1 所列^[49-53]。

2022 年,国防科技大学胡以华团队深化了反

射层析技术研究,实现了 10.38 km 处 cm 级目标的超分辨成像,是截至目前国内外报道的最高水平^[53],其实验系统和成像结果如图 4 所示。

表 1 典型光电主动侦察系统

Tab. 1 Typical electro-optical active reconnaissance systems

年份	机构	类别	性能
2017	中国科学院上海光学精密机械研究所 ^[49]	合成孔径激光雷达	对距离分别为 1.8、3.4 km 的无人机载角锥的成像分辨率分别为 7.2 mm×5.8 mm 和 12.7 mm×9.2 mm;对 6.8 km 的角锥目标成像分辨率优于 5 cm
2021	中国科学技术大学 ^[1]	单光子三维成像激光雷达	在像元扫描方式下实现了 201.5 km 处山体三维成像,图像分辨率为 320×512 像素,单个像素获取时间 189.7 ms
2022	中国科学院长春光学机械与物理研究所 ^[50]	OPA 激光雷达	视场角 180°,光束发散角优于 1.4 mrad,采用线性调频模式,测距误差 0.1 cm,精度 3.5 cm,速度误差 0.15 cm/s
2022	中国科学院安徽光学精密机械研究所 ^[51]	单像素成像激光雷达(SSPIL)	波长 1 064 nm,脉宽<7 ns,脉冲重频 400 Hz,脉冲能量 400 mJ,二维振镜角分辨率 12 μrad,实现了±12°扫描
2023	中国科学技术大学 ^[52]	单光子阵列探测系统	在 20 km 距离上获得了的深度和强度图像,并在超过 10.5 km 的薄雾中以 20 帧/s 的速度对运动目标实时 3D 成像
2022	国防科技大学 ^[53]	反射层析激光雷达	光学口径为 260 mm,对艺术字目标成像分辨率为 1.7 cm,优于相同口径下传统光学成像的 5 cm 极限分辨率

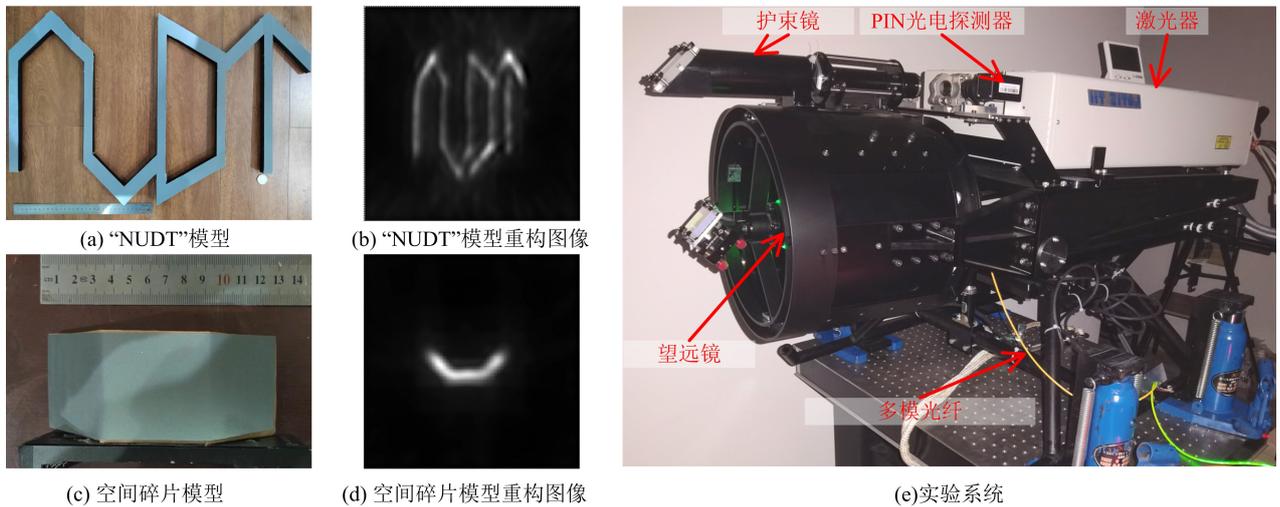


图 4 激光反射层析成像结果与系统结构图

Fig. 4 Diagram of the results and system of laser reflection tomography

在光信号探测方面,APD、PIN 等光电二极管的光电流与入射光功率成正比,处于线性探测模式。当前盖革模式 APD(GM-APD)、硅光电倍增管(SiPM)、超导纳米线探测器(SNSPD)等单光子探测器日益成熟,特别是 SNSPD 在响应波段、探测效率和计数率等方面优势明显,此类探测器

处于概率探测模式,可实现单光子探测。SNSPD 的响应波段覆盖 X 射线至中红外,在 532、850、1 064、1 550 nm 等波段系统的探测效率突破了 80%,甚至 90%,在 1 590 nm 实现了 98%的探测效率^[54];经优化后,SNSPD 的暗计数率 <0.1 Hz^[55],时间抖动 3 ps^[56],最大计数率超过

1 GHz^[57]。此外,GM-APD 通过自差分平衡、正弦门控方案及 2 种方案相结合等也可实现高计数率,门控方案应用较多,通过加载正弦门偏置来调控 GM-APD 增益层电场,降低了雪崩持续时间和后脉冲效应,门控频率为 1.5~2 GHz^[58],可将 APD 的死时间压缩至数 ns 量级。通过对单光子探测器阵列中的多像元复用也能提高计数率。

3.2 光电被动侦察技术

光电被动侦察利用对方光电设备辐射的光信号进行探测、识别和告警,主要涉及红外告警、紫外告警和激光告警等。红外告警通过探测来袭目标本身的红外辐射特征实现告警,通常探测 3~5 μm 中红外波段。红外告警系统主要分为扫描型和凝视型,其中分布孔径红外技术是机载红

外告警技术的最新成果,如 F-35 战斗机装备的 AN/AAQ-37 凝视型告警系统。紫外告警利用大气的“日盲区”特征,通过探测导弹的紫外辐射对导弹进行分类识别、精确定位,确定来袭方向并告警。紫外告警设备从技术上分为第一代概略型和第二代成像型,前者使用光电倍增管,后者使用像增强器。激光由于具有时空相干性,可利用干涉仪、光栅等实现激光波长告警,通过成像技术、掩模技术和光纤束技术等实现高精度来袭方位告警,光电对抗中的激光威胁信号主要是激光测距信号和指示信号,主要分布在 1.06、10.6、1.54 μm 等波长,其编码形式主要为精确频率码、周期型编码、脉冲间隔编码、等差型编码、位数较低的伪随机码以及脉宽编码等。当前被动侦察逐渐向复合告警方向发展^[59],其典型型号见表 2 所列。

表 2 典型光电被动侦察系统

Tab. 2 Typical electro-optical passive reconnaissance systems

告警体制	典型型号	主要功能
红外告警	多色红外告警系统 (MIRAS)	单探头视场 $184^\circ \times 138^\circ$, 3 个前端探测传感器拼接构成 4π 立体角的超大视场防御空域,工作在 3~5 μm 间的 2 个波段
	多光谱导弹告警系统 (MIMS)	探测波段 3.5~4.2 μm 和 4.3~4.9 μm ,能有效区分导弹和背景的红外辐射, MIMS 系统是常规紫外告警系统的虚警率的 1/5~1/3 倍,对导弹告警响应时间 <1 s
	AN/AAQ-37	采用 1 024×1 024 像素碲化铟红外焦平面阵列,视场 $90^\circ \times 90^\circ$,采用 6 个红外传感器形成 360° 球形覆盖,通过对比多个传感器的输出特性,判定目标属性
紫外告警	AN/AAR-47(V)1	第一代概略型,在敌导弹到达前 2~4 s 发布告警,视场角 92° ,采用 4 组探测器拼接,告警区域 $360^\circ \times 92^\circ$;适用于直升机和低空/慢飞的固定翼飞机
	AN/AAR-54(V)	第二代成像型,响应时间 1 s,视场角 120° ,角分辨率优于 1° ,可安装在固定翼飞机、直升机以及地面装备上
	AN/AAR-60	第二代成像型,单探测器视场 120° ,6 个探测器实现全空域覆盖,响应时间 <0.5 s,探测距离 5 km,可同时应对 8 个目标
激光告警	AN/VVR-4	采用 4 个 14 cm^2 的传感器单元,各传感器单元有 4 个传感器,提高探测概率的同时降低虚警率,是美国装甲战车的通用激光告警系统
	LWS-20V-3	由 4 个传感器、控制和显示单元和 1 个激光告警分析仪组成,为攻击、支援直升机和近距支援飞机提供激光告警
综合告警	101KS-U	单窗口 101KS-U/01 位于飞机前部两侧,2 个双光学窗口的 101KS-U/02 分别布置在机腹和机背,形成 360° 覆盖;双光学窗口含 2 个探头,大探头用于导弹逼近告警,小探头用于激光感应
	AN/AAR-47(V)2	各个探测头包含紫外告警和激光告警模块,2 个告警模块的光学视场完全重叠,均为 90° ,4 个探测头形成 $360^\circ \times 90^\circ$ 的监视范围

3.3 光电侦察抗干扰技术

在实际应用中,光电侦察系统通常面临对方采取的主、被动光电对抗措施威胁,造成光电探测能力下降。当前抗干扰技术主要是利用对方干扰光场和己方需解调的目标光场在编码、光谱、时空分布等多方面的差异实现“去伪存真”,如时域抗干扰:利用重频捷变、脉冲编码等技术,抗距离欺骗;空域抗干扰:利用目标与干扰的空间特征区别目标和干扰,主要用于成像方面;能域抗干扰:相变材料等抗激光有源干扰;频域反干扰:多模侦察等。随着高能激光技术的进步,抗激光致盲干扰是当前研究的重要方向,主要有光谱滤波技术、光限幅技术和基于相变材料的光开关技术等。

光谱滤波技术主要涉及光谱反射技术和光谱透射技术。2019年,姜玉刚等^[60]采用了可见光-近红外透明和中波吸收的玻璃基底与线性激光防护薄膜相结合的方法,实现了 1.315 μm 波长的反射和 0.5~0.8 μm 和 1.55 μm 波段的增透,在 0.5~0.8 μm 的平均透过率 > 96%, 1.55 μm 的透过率 > 98%,在 1.315 μm 的透过率 < 0.1%,在 2.7 μm 的透过率为 30%,在 3.8 μm 的透过率为 1.1%。光限幅技术利用光学材料在弱光照射时具有线性特性,在强光照射时产生非线性效应,典型材料是富勒烯 C_{60} ,响应速度在 ns 量级。相变材料光开关技术是一种特殊的非线性激光致盲防护技术,相变材料吸收热量达到一定的相变温度,发生从半导体相向金属相的转变,透射率在极短时间内下降从而实现激光限幅的功能,典型材料是 VO_2 、 V_2O_5 。使用 VO_2 热变色薄膜和 TiO_2 防辐射涂层制备的多功能智能窗口,对 3~5 μm 和 8~12 μm 波段红外光透过率 > 70%,当遭到致盲干扰时可在 ns 量级内使透过率 < 5%^[61]。

4 光电侦察面临的挑战

新型作战模式与新型光电装备中广泛应用的高能激光技术、光电干扰技术、隐身技术以及多样化威胁目标给传统光电对抗带来了新的挑战,传统光电侦察必须适应多样化的复杂应用场景。

4.1 激光软杀伤和硬摧毁的挑战

激光干扰是当前光电有源干扰的研究重点,

涉及致盲干扰、欺骗干扰和硬摧毁多个方面,逐渐具备了对光电目标的软杀伤和硬摧毁能力。激光致盲干扰利用低能量激光使 CCD、光电二极管等光电探测器饱和或损坏,不能正常实现光电转换,阻断侦察信息传递流程;激光欺骗干扰分为距离欺骗和角度欺骗,利用了光场时域调制特性,将干扰信息加载到对方的探测系统处理回路内,使之不能正确获取目标信息,通过投放激光引信无源干扰载荷,使威胁源的战斗部早炸。激光硬摧毁利用了高能激光实现目标的硬杀伤,具有鲜明的热应力损伤。当前光纤激光器已实现高光束质量高功率激光输出,单模功率可达 10.5 kW^[62],美军典型战术级激光武器可达数百 kW,如激光武器系统演示器(LWSD)实现了 150 kW 激光输出。此外,中红外激光器技术也取得突破,2022年国防科技大学实现了 3 810~4 496 nm 的窄线宽中红外发射,最大激光功率约 500 mW,斜效率 18%,686 nm 是迄今为止连续波光纤激光器实现的最大调谐范围^[63]。

4.2 红外有源/无源干扰的挑战

红外干扰主要利用了红外辐射的时域、光谱域等自由度,技术相对成熟,主要有红外干扰机、红外诱饵弹等,如 AN/AAQ-24 红外对抗系统、定向红外对抗系统(DIRCM),大型航空器红外线反制系统(LAIRC),能使红外制导武器信息处理回路失效。此外,动力型诱饵与目标在运动、光谱、空间位置、能量、形状等方面存在相似性,给光电侦察带来了较大挑战,主要有空气动力型诱饵、自推进诱饵和拖曳诱饵。

光电无源干扰可阻断光场信息的正确解译,严重制约光电侦察效能。红外无源干扰是当前研究热点,以红磷多组分烟幕材料为代表的热烟材料以改进配方为主;降低烟幕的热辐射有助于红外隐身,从而减小暴露风险,因此冷烟幕是当前研究的重点,在石墨、黄铜粉等材料方面的研究日益深入^[64]。典型的冷烟幕材料主要有:层状超分子烟幕材料,经过助剂复配后,尺度在 7~10 μm 的该类材料对 3~5 μm 和 8~14 μm 的光衰减率 $\geq 95\%$,消光作用明显;超细陶瓷粉,其消光能力与粒径密切相关,优选的粒径在 3.5~5.5 μm ;纳米粉体,在近红外和中远红外均具有很好的消光特性;超细铜粉和碳纤维在 8~14 μm

消光性能较好,超细铜粉平均质量消光系数 $0.78 \text{ m}^2/\text{g}$,在 31.2 m^3 烟箱中分别施放 30、40 g 超细铜粉后,对长波红外的衰减率 $>95\%$,且在 140 s 内红外衰减率变化很小^[65],1.5 mm/4 mm 长度短切碳纤维形成的云团对 $8\sim 14 \mu\text{m}$ 波段辐射的最大衰减率 $>95\%$ ^[66];膨胀石墨在 $3\sim 5 \mu\text{m}$

和 $8\sim 12 \mu\text{m}$ 波段消光性能较好,平均质量消光系数 $\geq 0.80 \text{ m}^2/\text{g}$ 和 $0.6187 \text{ m}^2/\text{g}$ ^[64]。此外,多分散生物凝聚粒子形状各异,有优良的宽波段消光特性,图 5 给出了 AN02 孢子生物消光材料的透过率曲线。由图可见,其在紫外-远红外较宽的光谱范围内均可实现良好的消光效果^[2, 67]。

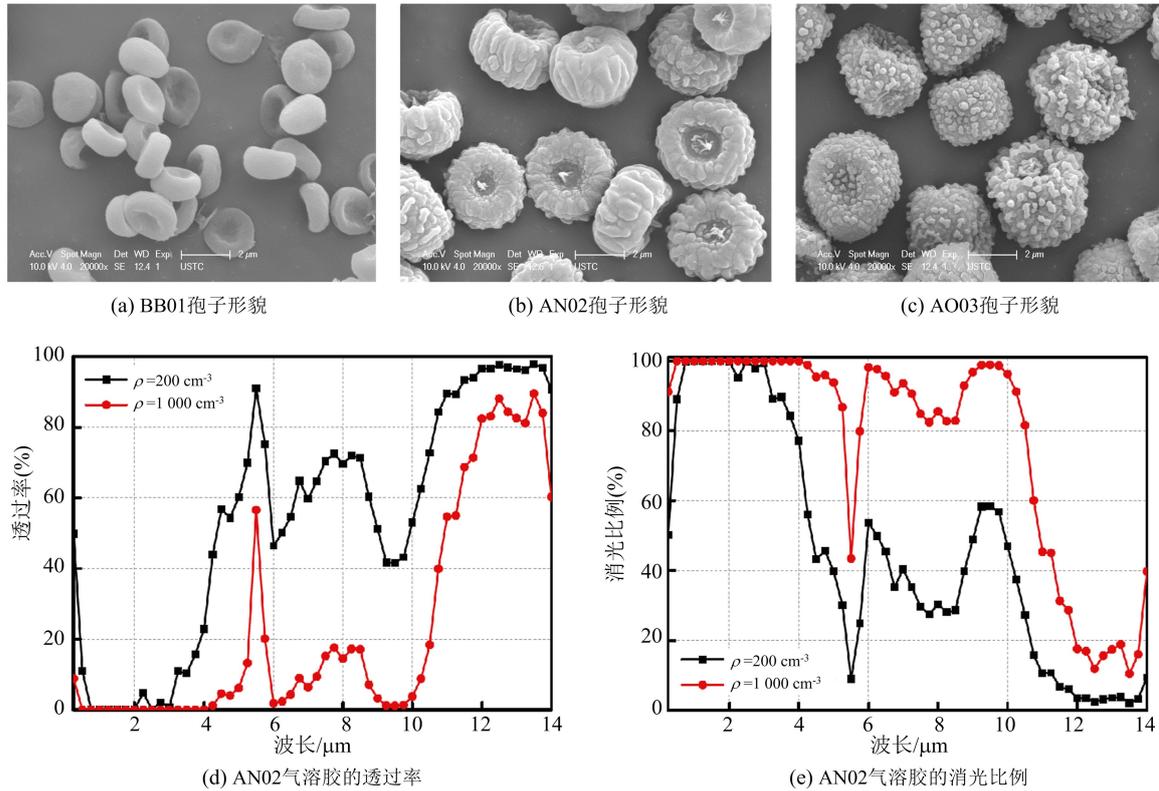


图 5 典型生物凝聚粒子及其宽波段消光能力

Fig. 5 Typical biological condensed particles and their broadband extinction ability

4.3 宽波段光电伪装与隐身技术的挑战

光电伪装和隐身技术为代表的光电防护技术为有效实施光电侦察也提出了较大挑战,对方的光电防护措施将降低我方对其光电设备和相关信息的侦测。光电伪装相对成熟,主要利用可见光、红外和宽频谱伪装网和伪装毯。光电隐身技术的研究热点是激光隐身。

目前,光电伪装技术已逐渐向多光谱伪装方向发展。典型的伪装系统有:2018年 Fibrotex 公司研制的“超轻型伪装网系统”(ULCNAS)、瑞典萨伯公司的“梭鱼”多光谱伪装系统、BAE 公司的 ADAPTIV 系统等。此类伪装系统可使人员和装备在雪地、城市等多种作战环境中躲避可见光成像设备、红外热像仪、激光雷达等光电传感器探测。采用 VO_2 等相变材料也可提升伪装的动态

性,2021年,BUHARA 等^[68]提出了一种相变材料耦合电介质纳米天线的中红外自适应伪装方法,成功模拟了大气窗口的光谱特性。

光学隐身是当前的研究热点,主要采用形状设计和材料技术降低目标的激光雷达散射截面。在形状隐身方面主要是消除可产生角反射器效应的外形组合,如变后向散射为非后向散射,采用边缘衍射代替镜面反射,平板外形代替曲面外形,减少散射源的数量等。在材料隐身方面主要有:1) 稀土上转换材料,利用稀土元素的亚稳态能级特性吸收多个低能量长波辐射,转变为高能短波辐射,如对抗 $1.06 \mu\text{m}$ 激光,可将 Sm^{3+} 、 Er^{2+} 掺杂在基质体系中降低 $1.06 \mu\text{m}$ 的回波强度。2) 光子晶体材料,其介电常数具有空间周期性分布且具有光子带隙,光子晶体可实现“光谱

挖孔”结构,在常见的激光波长附近的窄波段内有低反射率,在光子晶体薄膜基底引入吸收材料,进一步吸收缺陷能级透过的激光,多膜层结构材料在 532 nm 和 1 064 nm 处的理论透过率 $< 0.01\%$,在可见光波段透过率 $> 80\%$ ^[69]。

3) 有机材料,改变有机分子的氧化-还原状态来调节其分子结构和电子跃迁能带,实现在可见光和红外波段的独特响应^[70]。

4.4 多样化威胁目标的挑战

光电制导武器具有精度高、不易受电磁干扰,可以主动、被动模式工作,并且制导体制不断增多,呈现出谱系化、复合化、多样化的态势,制导精度与抗干扰性能不断提高,对抗难度日益增大,传统光电侦察系统在目标准确识别方面仍面临挑战。此外,对各类小型固定翼无人机、旋翼无人机、三角翼或空飘球等低、慢、小目标的检测与跟踪也是光电对抗面临的新威胁源之一。当前主要是通过成像和深度学习实现目标检测。未来战争中需要光电对抗系统能够迅速感知作战环境与威胁目标,以便对威胁目标快速自动检测、分类识别,进而形成有针对性的精确对抗,在线评估,形成闭环对抗,加速对抗进程,提高光电对抗成功率,有效应对多种光电威胁目标。

4.5 远程超分辨成像的挑战

战场态势的复杂性需要光电侦察具有对远程目标的精确成像能力,以便更好地识别目标。当前,具备远程超分辨成像的激光主动成像体制主要由合成孔径激光雷达、激光反射层析成像激光雷达等,该类体制的成像分辨率与距离和系统口径无关,是典型的计算成像。合成孔径激光雷达需要一个特殊的发射和采样之间的同步系统以确保距离向聚焦信号的初始相位同步,不产生相位历程的干扰而影响成像质量。此外,单个相干探测器所能成像的视场角相对较小,阵列相干探测能力仍需拓展,如加强 8×8 或者 16×16 的阵列相干探测器研制,扩大合成孔径相干激光成像雷达的成像视场;提升平台和目标运动间的相位补偿能力,从而实现精确成像。对于激光反射层析成像而言,尚需克服成像过程中目标质心的漂移、图像重构算法和三维激光反射层析成像等难题。

5 光电侦察技术未来发展方向

2019 年新版国防白皮书《新时代的中国国防》中指出:人工智能、量子信息、大数据、云计算、物联网等前沿科技加速应用于军事领域,国际军事竞争格局正在发生历史性变化。以信息技术为核心的军事高新技术日新月异,武器装备远程精确化、智能化、隐身化、无人化趋势更加明显。顺应科技和装备发展趋势,光电侦察技术有如下发展方向。

5.1 人工智能赋能光电侦察

5.1.1 人工智能加速宽谱高能激光的设计与性能预测

激光器是光电主动侦察中最重要的基础器件之一,激光的波长已覆盖极紫外至远红外,峰值功率已达到 PW 量级^[71]。但受制于基础理论、材料科学、器件加工工艺等因素,传统的激光器设计与检测方法面临周期长、性能提升慢等难题。光电对抗对更宽调谐范围、更高输出功率、更精确的可控谱线和更多调制维度的激光源的需求日益迫切。随着人工智能(AI)技术的发展,AI 算法对激光器等相关器件设计时能提高工作效率和器件设计质量,已在光子晶体光纤、轨道角动量(OAM)传输光纤设计和性能预测方面取得广泛应用^[72-74],加速了新型激光器的设计和生产周期,如半导体激光器出光光谱预测、锁模光纤激光器优化设计等。激光相干合成是突破单纤功率提升瓶颈、实现超高功率近衍射极限激光输出的有效途径^[75-76],然而,经典的主动相位方法(例如随机并行梯度下降算法)的控制带宽随着合束数量的增加而减小^[77],AI 算法可对激光的强度、相位、偏振和波前等特性进行自适应控制和高精度调控,有力支撑了光纤相干合成技术的进步^[78]。

5.1.2 人工智能提升认知光电侦察性能

认知光电对抗是应对智能化光电威胁源的有效措施,涉及认知侦察告警、认知干扰决策、作战数据分析与动态知识库、群组协同光电对抗和在线效果评估等关键技术。AI 贯穿认知光电对抗全流程,能较好提升决策质量和速度。认知光电侦察具备多光谱或全波段信息感知能力,可综合采取主/被动光谱探测技术进行探测,为后续

的学习、推理、决策提供较完善的环境信息与敌方态势信息,将探测的目标基本特征与威胁目标数据库利用 AI 算法等匹配,判断目标的类别、威胁等级和威胁行为,改善光电侦察效率。AI 技术将助力未知的复杂激光信号样式的准确识别与高保真转发等。AI 技术通过多领域、多层次、多角度的信息感知与收集,充分发挥认知光电侦察系统对大量数据的融合与综合处理能力,通过优化己方光电侦察信号的抗干扰编码样式、应对智能光电侦察的对抗样本的模式和自适应伪装等措施,提高光电侦察抗干扰能力。通过 AI 赋能,光电对抗技术有望实现侦察、干扰和防御的一体化,具备自动识别波长、方位、编码的能力,可以自适应实施有源/无源干扰,提高己方对战场环境的适应性,实现光电对抗过程 OODA 闭环化、探测感知融合化、对抗方式高效化、综合处理和决策评估智能化。

5.2 光电侦察系统的集成化一体化与处理的全光化

随着芯片技术、微纳光学和新型光场调制技术等进步,光电侦察系统的集成化、小型化、轻量化水平日益提升。光电微系统实现了传感器、控制器、执行器和算法等集成,兼具大带宽、低损耗和低延时等优点,在目标探测、光子处理等领域发挥了重要作用^[79]。快速光束控制技术是实现光电侦察、目标跟踪和精确干扰的基础性技术,光电相控阵技术在快速光束控制方面有独到优势,应用前景广阔,通过液晶、微机电系统、光波导等多种方式实现光束的无惯性、快速转向。此外,片上光源技术、光学超构表面技术等技术的进步,使得激光的频率调谐能力、调谐速度和出光质量有了较大进展,为新型时空结构光的产生奠定了基础^[80],从而满足目标精密测速、测距、三维成像等需求。

光电、射频和通信多功能一体化是电子对抗装备的重要发展方向,光电微系统将整合传感器技术、硬件架构、搭载算法等,将不同平台、种类、功能和用途的光电对抗装备有机整合,构成光电对抗网,形成数据获取、数据处理和指挥控制的一体化。光电对抗作为电子对抗的重要组成部分,应利用电子对抗的体系优势,提高光电对抗系统与雷达对抗、通信对抗等电子对抗系统的数

据融合能力,将多个体系、多个探测平台的预警信息综合处理,引导光电对抗实施更加可靠的侦察,实现跨体系多平台复合对抗手段的一体化。单光子探测和红外成像探测相结合的复合探测模式已实现对百 km 量级民航飞机的准确发现。合成孔径激光成像雷达发散角小、角分辨率高、电磁干扰能力强;而微波雷达搜索能力强、但对电磁干扰敏感,二者存在强互补性。采用微波和激光主动遥感相配合使用可以发挥更大作用。此外,多模式复用带来了高维信息耦合机制与信息解译问题,亟需厘清单光子探测、相干探测机制下目标图像、距离、速度、振动等信息的耦合规律,探索背景光混叠、高维信息相互耦合特性的回波信号解译方法,有效提取目标的多维信息。

光子处理技术的进步对提高光电对抗中“感知—干扰—打击—评估”全流程的时效性提供了重要支撑。随着光电对抗信息感知维度的提升和 AI 技术应用,海量数据处理的实时性、可靠性面临巨大的挑战,利用光子处理技术加速传统电子运算是重要趋势。对全光神经网络架构的研究如火如荼,神经网络已经可直接在光子芯片上训练。2021 年,蒙纳士大学演示了一种用于矢量处理的通用光学卷积加速器,运行速度为 11.3 TOPS,并基于矩阵的方法对 250 000 像素的大规模图像进行了卷积^[81],完成了手写数字图像的识别实验,准确率可达 88%,证明了光学计算在人脸识别等实时大规模计算中的应用可能。片上光子处理技术的进步将促进 AI 处理能力的提升,提高反射层析成像、合成孔径激光成像等超分辨成像能力。

5.3 光电侦察向全波段动态对抗发展

得益于光电探测技术、激光器技术和材料技术等进步,光电侦察告警从单一波长扩展到紫外、可见光、激光、红外等全光波段,提高了侦察告警的灵活性,光电侦察中使用的波长、编码等具有更高的自由度,具有更加鲜明的动态特性。在光电主动侦察方面,可综合利用超连续激光、频率捷变激光或多波长激光实施探测,无需获取对方光电干扰或防御波段的先验信息,利用对方干扰或防御的薄弱波段可实现目标多维信息获取;全波段的精确编码技术提高了己方光电探测设备的抗干扰性能。在光电被动侦察方面,多波

段融合告警是重要趋势,在当前激光/紫外融合告警基础上,全波段融合告警具有现实可行性,如主要的激光波长与红外波段的探测可以共窗口;典型告警波段的多谱凝视型探测技术逐渐成熟,克服了扫描型红外告警成像时间长、图像畸变等不足,降低光电信号虚警率,提升成像器件的灵敏度、空间分辨率和光谱探测水平是有待深入研究的重要内容。此外,光电告警将并与其他光电装备形成搭配,将导弹告警、态势感知、辅助导航等多功能一体化。

光电对抗具有鲜明的动态性,光电侦察过程也存在多个层次,在对方光电搜索、精密测距和精确制导武器打击等关键环节实施动态多样的光电侦察措施,将有助于提升光电对抗的针对性和效能。主动光电侦察手段有效支撑了光电对抗从传统的单一末端防御应用向远程、高分辨、迅捷对抗应用的发展,提升光电目标多维信息的远程主动感知和典型威胁目标光电辐射信号侦测的可靠发现、识别和利用能力。

5.4 由单模式光电侦察向多光谱一体化方向发展

传统的光电侦察主要在红外波段实现测距、成像,告警波段覆盖紫外至远红外,获取信息维度相对单一,工作模式固定,工作性能易受对方光电干扰等影响。随着激光器在波长、调制能力和功率等方面的进展,光电侦察可依托多波长激光结合频率、相位、强度和偏振调制技术实现目标多维信息的主动获取,提高目标和背景的差异度,提高目标检测概率,克服传统光电探测中单一距离信息探测模式易受光电干扰和背景干扰的不足。随着光束调制技术和成像算法的进步,散射介质中的主动光电探测能力稳步提高,如光学相位共轭、反馈优化和传输矩阵等波前整形方法,散斑相关成像和点扩展函数法等基于光学效应的散射成像方法,深度学习算法等基于机器学习的散射成像技术等,拓展了传统光电侦察系统在云雾、水体等强散射环境中的适应性。

得益于单光子器件工艺的成熟,光电系统对微弱光信号的探测从传统的单点逐步拓展到光子面阵探测成像,光电感知的范围也突破至数百 km 量级,对光电目标感知涵盖了光谱、偏振、运动特性等多个维度,有力支撑了对远程运动目标

的多维立体成像技术,大大提高了光电侦察的效能。激光三维成像能穿透目标的伪装,但有效成像光子数较少时无法准确识别目标,需要在单光子三维成像装置的基础上,升级偏振通道和高光谱通道,通过偏振特性和光谱特性滤除干扰,提高远程运动目标检测的可靠性。

6 结束语

光电侦察方向性好、抗电磁干扰能力强且具有多维信息获取能力。随着高能激光、宽波段隐身、光电干扰和人工智能技术等发展,光电侦察亟需从对抗机理出发,在宽波段、高精度、多维度、高时效等方面取得突破。当前已具备对光场偏振、相位、波长和相干性等多维物理量的精确调控能力,为提升光电侦察的信息获取维度奠定了基础。光电侦察技术有了长足发展,但仍面临激光干扰、红外干扰、多样化目标威胁、远程超分辨成像等诸多挑战,有望通过提升对光场多维信息的利用能力解决该类问题。随着人工智能与光电侦察深度融合以及系统集成化和智能化水平的进步,光电侦察在多模式融合探测和信息的全光处理基础上,将从传统的末端防御为主逐渐发展为全波段、多维度、高分辨迅捷测量手段,必将在信息战方面发挥重要作用。

参 考 文 献

- [1] LI Z P, YE J T, HUANG X, et al. Single-photon imaging over 200 km[J]. *Optica*, 2021, 8(3): 344-349.
- [2] HU Y, ZHAO X, GU Y, et al. Significant broadband extinction abilities of bioaerosols[J]. *Science China Materials*, 2019, 62(7): 1040-1052.
- [3] WU Y, TAN S, ZHAO Y, et al. Broadband multi-spectral compatible absorbers for radar, infrared and visible stealth application[J]. *Progress in Materials Science*, 2023, 135: 101088.
- [4] HERZOG C, GRANIER X, HARMS F, et al. Study of contrast variations with depth in focused plenoptic cameras[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(19): 4825-4828.
- [5] LI Z, ZANG Z, HAN Y, et al. Solid-state FMCW LiDAR with two-dimensional spectral scanning using a virtually imaged phased array[J]. *Optics Express*, 2021, 29(11): 16547-16562.
- [6] HU Y, DONG X, ZHAO N, et al. System efficiency of heterodyne lidar with truncated Gaussian Schell-

- Model beam in turbulent atmosphere[J]. *Optics Communications*, 2019, 436: 82-89.
- [7] RODRIGO P J, LARSEN H E, PEDERSEN C. CW coherent detection lidar for micro-Doppler sensing and raster-scan imaging of drones[J]. *Optics Express*, 2023, 31(5): 7398-7412.
- [8] YI L, KANAME R, MIZUNO R, et al. Ultra-wide-band frequency modulated continuous wave photonic radar system for three-dimensional Terahertz synthetic aperture radar imaging[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2022, 40(20): 6719-6728.
- [9] DORRAH A H, CAPASSO F. Tunable structured light with flat optics[J]. *Science*, 2022, 376(6591): 6860.
- [10] HSIEH C M, MALIK M O A, LIU Q. High-speed feedback based wavefront shaping for spatiotemporal enhancement of incoherent light through dynamic scattering media[J]. *Optics Letters*, 2023, 48(9): 2313-2316.
- [11] LEI Y Y, YI K, ZHAO Y T. Study on encryption techniques of distance measurement in laser fuze[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, 1213(5): 052013.
- [12] YU S, ZHANG Z, XIA H, et al. Photon-counting distributed free-space spectroscopy[J]. *Light: Science & Applications*, 2021, 10(1): 212.
- [13] BERG-JOHANSEN S, TÖPPEL F, STILLER B, et al. Classically entangled optical beams for high-speed kinematic sensing[J]. *Optica*, 2015, 2(10): 864-868.
- [14] LOUSSERT C, BRASSELET E. Efficient scalar and vectorial singular beam shaping using homogeneous anisotropic media[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(1): 7-9.
- [15] ZHANG Z, ZHANG Q, CHENG T, et al. Waveplate phase shifting method[J]. *Optical Engineering*, 2013, 52(10): 103109.
- [16] FU S, GAO C, WANG T, et al. Simultaneous generation of multiple perfect polarization vortices with selective spatial states in various diffraction orders[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(23): 5454-5457.
- [17] LIU A, FU F, WANG Y, et al. Polarization-insensitive subwavelength grating reflector based on a semiconductor-insulator-metal structure[J]. *Optics Express*, 2012, 20(14): 14991-15000.
- [18] JIAN W. Metasurfaces enabling structured light manipulation: advances and perspectives[J]. *Chinese Optics Letters*, 2018, 16(5): 050006.
- [19] 孙汝生, 刘通, 王琛, 等. 基于级联涡旋半波片的高阶柱矢量光束产生及其偏振检测[J]. *光学学报*, 2022, 42(13): 182-189.
- SUN Rusheng, LIU Tong, WANG Chen, et al. High-order cylindrical vector beam generation and its polarization detection based on cascade vortex half-wave plates[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(13): 182-189. (in Chinese)
- [20] WEI T, XIA H, HU J, et al. Simultaneous wind and rainfall detection by power spectrum analysis using a VAD scanning coherent Doppler lidar[J]. *Optics Express*, 2019, 27(22): 31235-31245.
- [21] JARVIS T W. Multiplexing acousto-optic modulators to steer polychromatic laser beams[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2015, 32(1): 83-91.
- [22] WANG Z, WANG C, LIANG S, et al. Liquid crystal spatial light modulator based non-mechanical beam steering system fractional-order model[J]. *Optics Express*, 2022, 30(7): 12178-12191.
- [23] BADAL M T I, SCOTT J, WANG K. Multimode optical phased array for parallel beam steering feasibility study[J]. *Optics Express*, 2023, 31(12): 18907-18930.
- [24] WANG Z, SONG W, CHEN Y, et al. Metasurface empowered lithium niobate optical phased array with an enlarged field of view[J]. *Photonics Research*, 2022, 10(11): 23-29.
- [25] ZHOU J, QIAN K. Low-voltage wide-field-of-view lidar scanning system based on a MEMS mirror[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(5): 283-290.
- [26] ENGSTRM D, O'CALLAGHAN M J, WALKER C, et al. Fast beam steering with a ferroelectric-liquid-crystal optical phased array[J]. *Applied Optics*, 2009, 48(9): 1721-1726.
- [27] YAACOBI A, SUN J, MORESCO M, et al. Integrated phased array for wide-angle beam steering[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(15): 4575-4578.
- [28] YANG W, SUN T, RAO Y, et al. High speed optical phased array using high contrast grating all-pass filters[J]. *Optics Express*, 2014, 22(17): 20038-20044.
- [29] SUN J, TIMURDOGAN E, YAACOBI A, et al. Large-scale nanophotonic phased array[J]. *Nature*, 2013, 493: 195-199.
- [30] POULTON C V, YACCOBI A, SU Z, et al. Optical phased array with small spot size, high steering range and grouped cascaded phase shifters[C]//*Proceedings of Integrated Photonics Research, Silicon & Nanophotonics*. [S.l. :s.n.], 2016: IW1B.2.
- [31] WANG X, WEIGEL P O, ZHAO J, et al. Achieving beyond 100 GHz large-signal modulation bandwidth in hybrid silicon photonics Mach Zehnder modulators

- using thin film lithium niobate[J]. *APL Photonics*, 2019, 4(9): 096101.
- [32] 刘海峰, 郭宏杰, 谭满清, 等. 铌酸锂薄膜调制器的研究进展[J]. *中国光学*, 2022, 15(1): 1-13.
LIU Haifeng, GUO Hongjie, TAN Manqing, et al. Research progress of lithium niobate thin-film modulators[J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(1): 1-13. (in Chinese)
- [33] YING P, TAN H, ZHANG J, et al. Low-loss edge-coupling thin-film lithium niobate modulator with an efficient phase shifter[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(6): 1478-1481.
- [34] AHMED A N R, NELAN S, SHI S, et al. Subvoltage electro-optical modulator on thin-film lithium niobate and silicon nitride hybrid platform[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(5): 1112-1115.
- [35] HONARDOOST A, JUNEGHANI F A, SAFIAN R, et al. Towards subterahertz bandwidth ultracompact lithium niobate electrooptic modulators[J]. *Optics Express*, 2019, 27(5): 6495-6501.
- [36] REN T, ZHANG M, WANG C, et al. An integrated low-voltage broadband lithium niobate phase modulator[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2019, 31(11): 889-892.
- [37] XU M, HE M, ZHANG H, et al. High-performance coherent optical modulators based on thin-film lithium niobate platform[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 3911.
- [38] HE M, XU M, REN Y, et al. High-performance hybrid silicon and lithium niobate Mach-Zehnder modulators for 100 Gbit/s and beyond[J]. *Nature Photonics*, 2019, 13(5): 359-364.
- [39] SHAO L, YU M, MAITY S, et al. Microwave-to-optical conversion using lithium niobate thin-film acoustic resonators[J]. *Optica*, 2019, 6(12): 1498.
- [40] YU Z, SUN X. Acousto-optic modulation of photonic bound state in the continuum[J]. *Light: Science & Applications*, 2020, 9(1): 33-41.
- [41] MA L L, LI C Y, PAN J T, et al. Self-assembled liquid crystal architectures for soft matter photonics[J]. *Light: Science & Applications*, 2022, 11(1): 270.
- [42] JULIANO M R, MARINOV E, YOUSSEF M A B, et al. Metasurface-enhanced light detection and ranging technology[J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 5724.
- [43] HU X D, WU X Q, YANG Q K, et al. Estimation and characterization of atmospheric turbulence in the free atmosphere above the Tibetan Plateau using the Thorpe method[J]. *Applied Optics*, 2023, 62(4): 1115-1122.
- [44] RABINOVICH W S, MAHON R, FERRARO M S. Optical scintillation in a maritime environment[J]. *Optics Express*, 2023, 31(6): 10217-10236.
- [45] XU Y, LAN B, LIU C, et al. Adaptive optics pre-compensation for orbital angular momentum beams transmitting through simulated atmospheric turbulence[J]. *Optics Express*, 2023, 31(9): 13665-13671.
- [46] ZHONG Z, ZHANG X, ZHANG B, et al. Mitigation of atmospheric turbulence effect by light beams carrying self-rotating wavefront[J]. *Optics Express*, 2022, 30(14): 24421-24430.
- [47] 刘永雷, 董震, 陈亚红, 等. 新型相干结构光场调控及应用研究进展[J]. *光电工程*, 2022, 49(11): 1-28.
LIU Yonglei, DONG Zhen, CHEN Yahong, et al. Research advances of partially coherent beams with novel coherence structures: engineering and applications [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2022, 49(11): 1-28. (in Chinese)
- [48] CAI Y, CHEN Y, YU J, et al. Generation of partially coherent beams[J]. *Progress in Optics*, 2017, 62: 157-223.
- [49] LI G, LU Z, ZHOU Y, et al. Far-field outdoor experimental demonstration of down-looking synthetic aperture lidar[J]. *Chinese Optics Letters*, 2017, 15(8): 082801.
- [50] MINGSHI Z, YUBING W, LANXUAN Z, et al. Phase-modulated continuous-wave coherent ranging method for optical phased array lidar[J]. *Optics Express*, 2023, 31(4): 6514-6528.
- [51] HUANG J, LI Z, SHI D, et al. Scanning single-pixel imaging lidar[J]. *Optics Express*, 2022, 30(21): 37484-37492.
- [52] JIANG P Y, LI Z P, YE W L, et al. Long range 3D imaging through atmospheric obscurants using array-based single-photon LiDAR [J]. *Optics Express*, 2023, 31(10): 16054-16066.
- [53] 胡以华, 张鑫源, 韩飞, 等. 反射层析激光雷达实现小远目标超分辨率成像[J]. *中国激光*, 2023, 50(3): 0316003.
HU Yihua, ZHANG Xinyuan, HAN Fei, et al. Super-resolution imaging of small and far targets using reflection tomography lidar[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 50(3): 0316003. (in Chinese)
- [54] HU P, LI H, YOU L, et al. Detecting single infrared photons toward optimal system detection efficiency[J]. *Optics Express*, 2020, 28(24): 36884-36891.
- [55] SHIBATA H, FUKAO K, KIRIGANE N, et al. SNSPD with ultimate low system dark count rate using various cold filters[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2016, 27(4): 1-4.
- [56] KORZH B, ZHAO Q Y, ALLMARAS J P, et al.

- Demonstration of sub-3 ps temporal resolution with a superconducting nanowire single-photon detector[J]. *Nature Photonics*, 2020, 14(4): 250-255.
- [57] 周慧, 张成俊, 吕超林, 等. 基于超导纳米线单光子探测技术的成像研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(10): 1011005.
ZHOU Hui, ZHANG Chengjun, LYU Chaolin, et al. Recent progress of imaging applications based on superconducting nanowire single-photon detectors [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(10): 1011005. (in Chinese)
- [58] 王天焯, 费起来, 徐博, 等. GHz 重复频率可调 InGaAs/InP 单光子探测器[J]. *红外与毫米波学报*, 2021, 40(6): 840-846.
WANG Tianye, FEI Qilai, XU Bo, et al. GHz InGaAs/InP single-photon detector with tunable repetition frequencies[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2021, 40(6): 840-846. (in Chinese)
- [59] 刘彤宇, 闫秀生, 王恒立. 国外机载导弹逼近告警装备发展趋势分析[J]. *激光与红外*, 2022, 52(8): 1107-1111.
LIU Tongyu, YAN Xiusheng, WANG Hengli. Analysis on the trend of foreign airborne missile approach warning technology[J]. *Laser & Infrared*, 2022, 52(8): 1107-1111. (in Chinese)
- [60] 姜玉刚, 刘华松, 王利栓, 等. 卫星激光防护薄膜窗口的设计与制备技术研究[J]. *中国光学*, 2019, 12(4): 804-809.
JIANG Yugang, LIU Huasong, WANG Lishuan, et al. Design and preparation technology of laser protective film window of satellite[J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(4): 804-809. (in Chinese)
- [61] PING J. A novel multifunctional smart window with VO₂ and TiO₂ coatings[J]. *Journal of Shaanxi University of Science & Technology*, 2004, 22(5): 1-7.
- [62] 周朴, 冷进勇, 肖虎, 等. 高平均功率光纤激光的研究进展与发展趋势[J]. *中国激光*, 2021, 48(20): 1-26.
ZHOU Pu, LENG Jinyong, XIAO Hu, et al. High average power fiber lasers: research progress and future prospect[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(20): 1-26. (in Chinese)
- [63] ZHOU Z, WANG Z, HUANG W, et al. Towards high-power mid-IR light source tunable from 3.8 to 4.5 μm by HBr-filled hollow-core silica fibres [J]. *Light: Science & Applications*, 2022, 11(1): 15.
- [64] 王玄玉. 抗红外烟幕材料及消光性能研究进展[J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(7): 15-23.
WANG Xuanyu. Development of anti-infrared smoke material and its extinction performance[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(7): 15-23. (in Chinese)
- nese)
- [65] 周利存, 赵非玉, 肖杨. 超细铜粉烟幕材料的长波红外干扰特性研究[J]. *光电技术应用*, 2023, 38(2): 75-78.
ZHOU Licun, ZHAO Feiyu, XIAO Yang. Long wave infrared jamming characteristics of ultrafine copper powder smoke screen material[J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2023, 38(2): 75-78. (in Chinese)
- [66] 刘志龙, 王玄玉, 董文杰, 等. 短切碳纤维云团对毫米波/红外复合干扰性能影响[J]. *含能材料*, 2016, 24(12): 1219-1224.
LIU Zhilong, WANG Xuanyu, DONG Wenjie, et al. Composite interference performance of chopped carbon fiber clouds to millimeter wave and infrared [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2016, 24(12): 1219-1224. (in Chinese)
- [67] ZHAO X Y, HU Y H, GU Y L, et al. Analysis of optical properties of bio-smoke materials in the 0.25~14 μm band[J]. *Chinese Physics B*, 2019, 28(3): 34201.
- [68] BUHARA E, GHOBADI A, KHALICHI B, et al. Mid-infrared adaptive thermal camouflage using a phase-change material coupled dielectric nanoantenna [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2021, 54(26): 265105.
- [69] 张玉发, 孙晓泉. 光电设备激光防护技术研究进展[J]. *激光与红外*, 2014, 44(9): 954-965.
ZHANG Yufa, SUN Xiaoquan. Research progress of laser protection for photoelectrical devices[J]. *Laser & Infrared*, 2014, 44(9): 954-965. (in Chinese)
- [70] 吴昊, 赵涛, 王奎民. 光电干扰与激光隐身技术的发展分析[J]. *舰船电子工程*, 2013, 33(11): 14-17.
WU Hao, ZHAO Tao, WANG Kuimin. Development analysis of the electro-optic jamming and lasers stealth technical[J]. *Ship Electronic Engineering*, 2013, 33(11): 14-17. (in Chinese)
- [71] GALES S, TANAKA K A, BALABANSKI D L, et al. The extreme light infrastructure-nuclear physics (ELI-NP) facility: new horizons in physics with 10 PW ultra-intense lasers and 20 MeV brilliant gamma beams[J]. *Reports on Progress in Physics*, 2018, 81(9): 094301.
- [72] CHUGH S, GULISTAN A, GHOSH S, et al. Machine learning approach for computing optical properties of a photonic crystal fiber[J]. *Optics Express*, 2019, 27(25): 36414-36425.
- [73] JABIN M A, FOK M P. Prediction of 12 photonic crystal fiber optical properties using MLP in deep learning [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2022, 34(7): 391-394.

- [74] QIN H, HUANG W, SONG B, et al. Hybrid method for inverse design of orbital angular momentum transmission fiber based on neural network and optimization algorithms [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2022, 40(17): 5974-5985.
- [75] CHANG H, CHANG Q, XI J, et al. First experimental demonstration of coherent beam combining of more than 100 fiber lasers [J]. *Photonics Research*, 2020, 8(12): 1943-1948.
- [76] LIU Z, JIN X, RONGTAO S U, et al. Development status of high power fiber lasers and their coherent beam combination [J]. *Science China Information Sciences*, 2019, 62(4): 1-32.
- [77] 吴函烁, 蒋敏, 周朴. 人工智能赋能激光: 现状、机遇与挑战 [J]. *中国激光*, 2023, 50(11): 1101001.
WU Hanshuo, JIANG Min, ZHOU Pu. Artificial intelligence-assisted laser science and technology: status, opportunities, and challenges [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 50(11): 1101001. (in Chinese)
- [78] LIU R, PENG C, LIANG X, et al. Coherent beam combination far-field measuring method based on amplitude modulation and deep learning [J]. *Chinese Optics Letters*, 2020, 18(4): 041402.
- [79] KIM I, MARTINS R J, JANG J, et al. Nanophotonics for light detection and ranging technology [J]. *Nature Nanotechnology*, 2021, 16(5): 508-524.
- [80] LIN D, CARPENTER J, FENG Y, et al. Reconfigurable structured light generation in a multicore fibre amplifier [J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 3986.
- [81] XU X, TAN M, CORCORAN B, et al. 11 TOPS photonic convolutional accelerator for optical neural networks [J]. *Nature*, 2021, 589(7840): 44-51.

作者简介

胡以华

男, 1962 年生, 博士, 教授, 博士研究生导师, 研究方向为空间光电技术
E-mail: skl_hyh@163.com



董 晓

男, 1990 年生, 博士, 副研究员, 研究方向为激光雷达技术
E-mail: skl_dongxiao@163.com



责任编辑 董 莉