

先进夜视成像技术发展探讨

陈 钱^{1,2}

- (1. 南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094;
2. 南京理工大学 江苏省光谱成像与智能感知重点实验室, 江苏 南京 210094)

摘要: 夜视成像技术是在低照度条件下, 将不可见辐射加以转换或将微弱的夜天光进行增强, 以实现人眼夜间隐蔽观察的一种成像技术, 在夜间侦查瞄准、辅助驾驶、导航制导等现代军事应用中发挥着重要作用。为了确保“单向透明”, 充分发挥“拥有黑夜”的技术优势, 世界军事强国都投入大量人力、物力开展先进夜视成像技术研究, 使夜视装备性能得以迅速发展。本文作为本期《红外与激光工程》——“南京理工大学”专刊的引子, 概要地介绍了夜视成像技术当前的进展与所面临的挑战, 并对未来先进夜视成像技术的发展趋势——基于光电转换的光强直接成像与基于计算成像的信号反演成像分别进行了探讨与展望。

关键词: 夜视成像; 光电成像; 计算成像; 反演成像

中图分类号: O438 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20220128

Discussions on the development of advanced night vision imaging technology

Chen Qian^{1,2}

- (1. School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;
2. Jiangsu Key Laboratory of Spectral Imaging and Intelligent Sense, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Night vision imaging technology converts invisible radiation or enhances faint light at night under low illumination conditions to enable human eyes to see covertly at night. It plays an important role in modern military applications such as night detection and targeting, assisted driving, navigation and guidance. In order to ensure "one-way transparency" and give full play to the technical advantages of "dominating the night", the world's military powers have invested a lot of human and material resources to carry out research on advanced night vision imaging technology, so that the performance of night vision equipment can be rapidly developed. As the first article of this special issue of "Nanjing University of Science and Technology" for the *Journal of Infrared and Laser Engineering*, this paper outlines the current progress and challenges of night vision imaging technology, and provides a discussion and outlook of the future development trend of advanced night vision imaging technology—direct imaging based on photoelectric conversion and constructive imaging based on computational imaging, respectively.

Key words: night vision imaging; photoelectric imaging; computational imaging; constructive imaging

收稿日期: 2022-02-01; 修订日期: 2022-02-20

基金项目: 江苏省基础研究计划前沿引领专项 (BK20192003); 国家自然科学基金 (U21 B2033)

作者简介: 陈钱, 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事光电成像与信息处理等方面的研究。

0 夜视成像技术的发展与挑战

夜视技术是现代战争全天候作战的核心技术,为了确保“单向透明”,充分发挥“拥有黑夜”的技术优势,世界军事强国都投入大量的人力、物力开展先进夜视技术研究。夜视成像系统的技战术性能在军事需求牵引和光电成像技术的推动下不断地进步与提升,已成为覆盖多种作战平台乃至作战士兵获取信息

克敌制胜的重要装备。

夜视成像技术需要在低照度条件下实现人眼夜间隐蔽观察,其传统实现途径可分为两类:将微弱的夜天光进行增强或将不可见辐射加以转换。基于此,夜视装备也可以分为微光夜视仪和红外夜视仪两大类。近年来,新型的融合型夜视装备也逐步开始列装,如图 1 所示。夜视技术最终的研究目标,就是突破黑夜对人类视觉的限制,将黑夜变成“白天”。

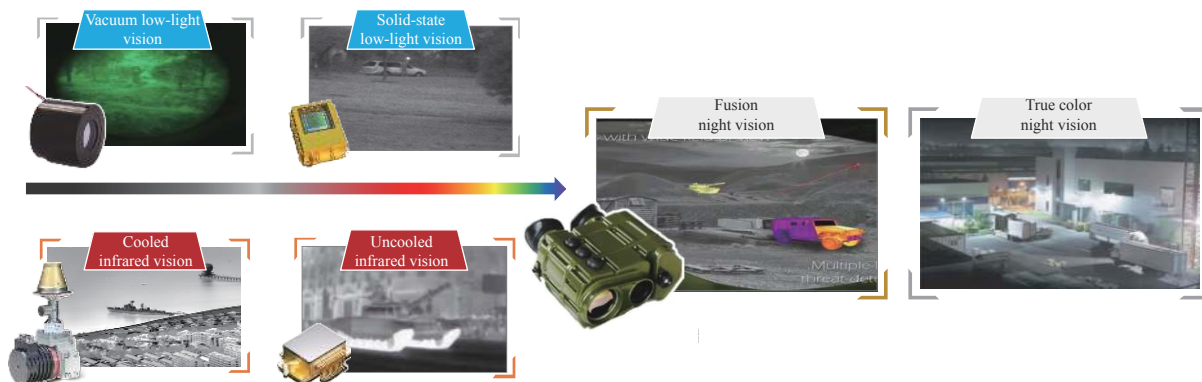


图 1 先进夜视成像装备的发展历程

Fig.1 Development of advanced night vision imaging equipment

夜视装备战术性能的提升主要依赖于核心夜视器件和信号处理技术的进步和发展,探测灵敏度(光通量)和空间分辨率(像元大小)是夜视装备的核心指标,且又相互制约。采用减小像元尺寸和增加阵列数量的方式来提高分辨率不可避免地导致光通量降低,以及严重的光电串扰,导致探测器的灵敏度下降。在夜视低照度条件下,目标场景的有限光子数、背景辐射与环境光的干扰对夜视装备的影响尤为突出,探测器灵敏度的下降使夜视装备目标分辨能力大幅下降与图像质量急剧恶化。因此,高灵敏度和高分辨率夜视成像一直是夜视技术发展所面临的重要挑战。

综上所述,未来的军事应用要求夜视成像系统能同时实现高灵敏度和高分辨率成像,而采用传统光电成像机理,即光强直接成像的方式面临着光电探测器工艺与光学系统物理极限的限制,进一步发展已面临瓶颈。因此,亟需探索更为先进的光电成像理论与方法,以满足未来复杂作战环境下的夜视成像需求。随着光学成像基础理论的发展、成像器件及其电子学的进步、计算机数据处理能力的增强,计算光学成像技术得到了快速发展,现已成为集几何光学、信息光

学、计算光学、现代信号处理等于一体的新兴交叉研究领域。因此,未来先进夜视技术的发展趋势应该是基于光电转换的光强直接成像与基于计算成像的信号反演成像二者的相辅相成,即“光强直接成像”+“信号反演成像”。

1 光强直接成像研究进展

传统夜视成像技术基于光强直接探测机理、探测器像素和目标场景之间通过建立一一对应关系来获取图像。因此,探测器是传统夜视成像技术的核心。红外成像经历了从基于单元或线列红外探测器的第一代红外成像系统,到基于 $4\times N$ 或 $8\times N$ TDI型红外焦平面阵列与二维凝视红外焦平面阵列的第二代红外成像系统,再到基于中波/长波二维大规格凝视红外焦平面阵列以及双波段/多波段凝视红外焦平面的第三代红外成像系统的发展历程。制冷型红外探测器的材料主要包括碲镉汞、铟化钢等,并逐步向更高灵敏度的量子阱光探测(QWIPs)、II类超晶格(II-SLs)与量子点光探测(QDIPs)演化。微光夜视技术利用光电效应将微弱光转换成光电子进行放大增强,

实现夜间低照度条件下目标反射强度的探测,其核心器件是图像增强器。提升夜视探测灵敏度的核心技术是光电子倍增技术,通过提高电荷倍增增益抑制输出噪声,从而提高信噪比。图像增强器主要分真空像增强器和固态像增强器,前者主要基于外光电效应,即金属阴极表面在能力超过“红限”的辐照作用下,吸收光子并激发出自由光电子的效应。后者主要基于内光电效应,即光照射到半导体表面时,内部电子吸

收光子能量激发载流子,从而使其导电性能改变的效应。光电子倍增机理从外光电效应级联倍增到内光电效应级联倍增,再逐步向像素内能带调控倍增发展,如图 2 所示。其中,基于像素内能带调控倍增机理的像元倍增阵列是一种全新的高带宽、低噪声的能带调控电荷倍增器件,其增益具有高可控性、高稳定性,同时倍增电压与外部驱动噪声更低,有望实现高分辨、高帧频、时间复合成像。

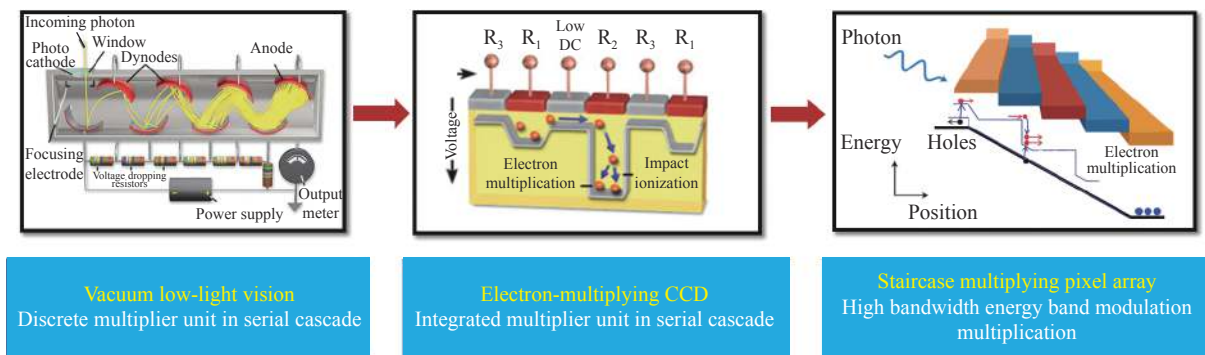


图 2 微光夜视器件的光电子倍增机理的发展阶段

Fig.2 Development stages of photoelectron multiplication mechanism of low-light level night vision devices

2 信号反演成像研究进展

当前,随着半导体材料和器件工艺能力水平的不断提升,夜视器件的探测灵敏度和像元规模不断增大,像元尺寸已与成像波长接近。受限于器件固有的热噪声和光学系统的衍射极限,夜视器件的探测灵敏度和空间分辨率已接近物理极限。而未来的军事应用要求夜视成像系统能同时实现高灵敏度和高分辨率成像,而传统光电成像技术继续发展已遇到瓶颈,

难以满足上述挑战性的需求。在此背景下,基于计算成像的信号增强反演成像为夜视成像技术带来了新的发展契机。不同于传统强度直接成像方法,信号增强反演成像需要对光学成像系统进行光场调控,将更多目标场景的本质信息调制到测量的光强信号中。对这一正向物理成像过程进行精确数学建模,再借助于与之相匹配的信号反演方法重构出目标图像,如图 3 所示。这种非直接的反演成像方式打破了传统光强直接成像技术对光学系统与探测器水平的高度

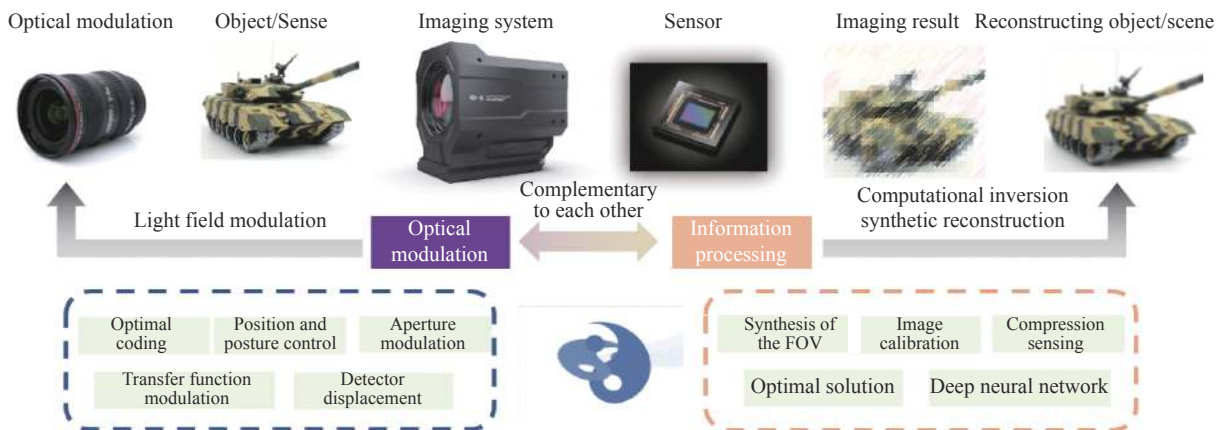


图 3 对正向物理成像过程进行数学建模并借助于信号反演方法重构图像

Fig.3 Mathematical modeling of forward physical imaging processes and reconstruction of images with the help of constructive imaging methods

依赖,为新一代高灵敏度和高分辨率夜视成像系统的发展打开了广阔的空间。总的来说,信号增强反演成像所面临的科学问题是部分相干光场下的高信噪比、高分辨率成像,其基本理论问题是非相干条件下互相关函数的建立与求解,而最终的研究目标是突破传统夜视成像系统的性能极限,实现负 dB 信噪比与超衍射极限成像。

3 负 dB 信噪比信号反演成像

夜视装备的探测能力取决于成像系统的信噪比,最终受限于光子起伏噪声和器件热噪声。在低照度下,探测器所拍摄到的图像信噪比较低,极低照度下

甚至会形成负 dB 信噪比(信噪比小于 1)图像。此时来自目标场景的信号极弱,几乎被噪声淹没,属于夜视成像中典型的“看不见”现象。负 dB 信噪比信号反演成像技术基于同一信号源反射(辐射)能量短时恒定特性,以及固定图案噪声(暗电流噪声和非均匀性)短时不变特性,建立帧间目标场景信号 S 、非均匀性噪声 N_p 、动态噪声 N_r 、成像投影矩阵间的互相关理论模型,利用同源信号在帧间和空间不同像元的相关性,从原始负 dB 信噪比图像 I 中将目标场景信号 S 计算反演出来,信噪比可提升一个数量级甚至更高,最终获得清晰的目标图像,其典型成像结果如图 4 所示。

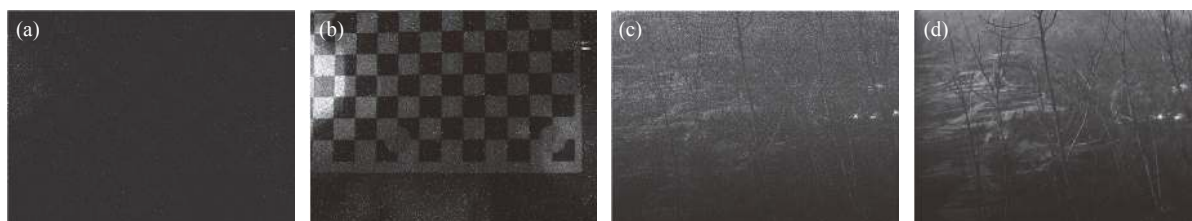


图 4 负 dB 信号反演成像技术实验结果。(a) 信噪比为-10.03 dB 暗室棋盘格原始图像;(b) 信噪比为 0.492 dB 暗室棋盘格反演图像;(c) 信噪比为-5.3 dB 山林原始图像;(d) 信噪比为 6.99 dB 山林反演图像

Fig.4 Experimental results of negative dB signal reconstructive technique. (a) The original image of the checkerboard in the darkroom with an SNR of -10.03 dB; (b) The reconstructive image of the checkerboard in the darkroom with an SNR of 0.492 dB; (c) The original image of the mountain forest with an SNR of -5.3 dB; (d) The reconstructive image of the mountain forest with an SNR of 6.99 dB

对于红外夜视图像,其噪声主要由像元离散性引起的图像非均匀性,具有很强的空间和时间相关性,且随热辐射信号和环境温度变化。通常采用有源定标校正工作方式,即使用挡片定温定时校正。当背景热辐射复杂多变时,易导致探测器校正参数失配,图

像质量急剧恶化。发展红外成像无源定标校正,一直是红外成像电子学研究试图攻克的重点和难点。同样,以上述互相关理论为基础,提出并实现了基于场景的“无源”非均匀性校正,其典型成像结果如图 5 所示。

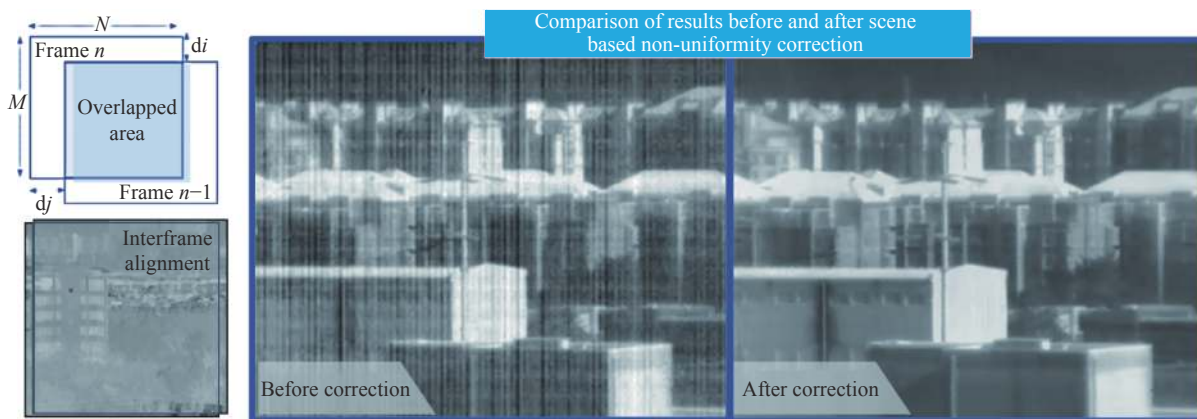


图 5 基于场景的“无源”非均匀性红外图像校正

Fig.5 Scene based "passive" IR image nonuniformity correction

4 超像素/超衍射极限分辨反演成像

图像的空间分辨率是对图像细节分辨能力的一种度量,是对成像系统图像质量评价的关键性指标。成像系统的分辨率主要包括图像分辨率(像元尺寸)与光学分辨率(衍射极限)。夜视器件为了保证足

够的灵敏度,要求像元具有较大的感光面积,此时像素空间采样不足,成像系统分辨率由探测器像素的奈奎斯特采样频率决定,如图 6 所示。只有当像素采样充足的前提下,成像分辨率才由光学衍射极限(艾里斑大小)决定,如图 7 所示。因此,像素混叠和衍射极限共同成为成像系统分辨率的两大制约因素。

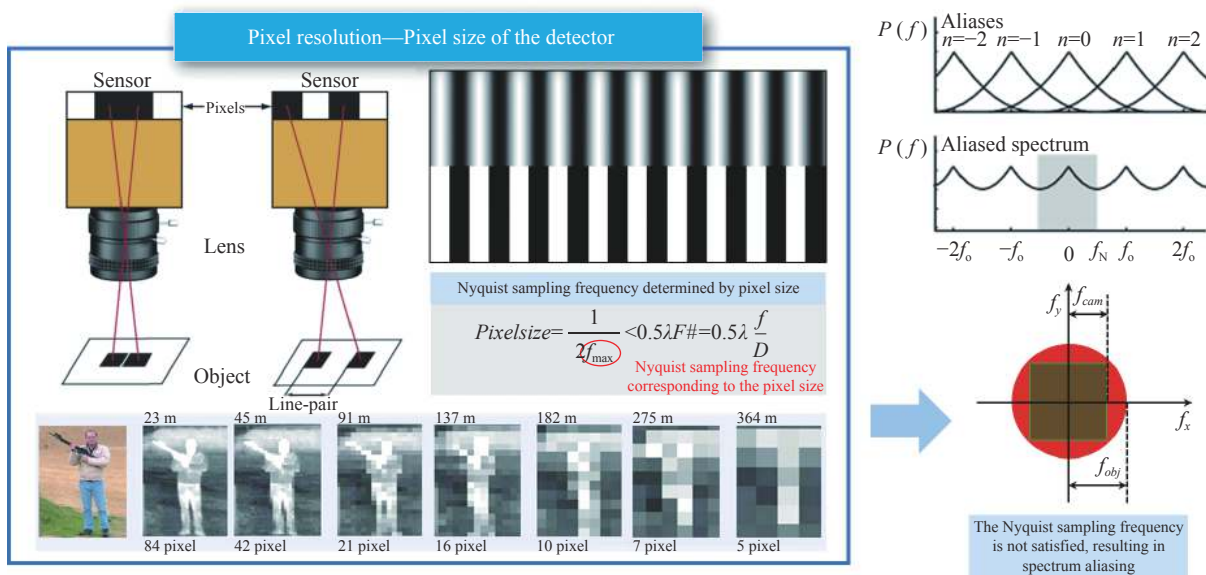


图 6 探测器像元大小所限制的奈奎斯特采样极限(马赛克效应)。像素采样不足(像素尺寸过大)会导致频谱混叠现象

Fig.6 Nyquist sampling limit imposed by detector pixel size (mosaic effect). Under-sampling (large pixel size) leads to spectral aliasing

针对探测器空间采样不足造成的图像像素混叠难题,本课题组提出了基于孔径编码的像素超分辨成像技术。该技术通过对成像系统孔径平面的光强进行掩膜调制,基于此调控成像系统的点扩散函数,以使其各向异性并可覆盖多个物理像素。成像系统在不同孔径编码调控下对同一场景进行多次采样,然后将所拍摄到的低分辨率混叠图像在频域进行迭代重构与解混叠。最终可反演出目标场景中小于像素尺寸的高频细节成分,如图 8 所示。实验结果表明,采用该技术可使成像系统的分辨率提升至探测器物理尺寸所限制的奈奎斯特采样频率的 3 倍以上,进而实现“亚像素”成像(见图 9)。该方法不借助于物理移动器件或空间扫描机制,为突破探测器空间采样不足所造成的分辨率受限提供了一条崭新的思路。

当探测器像素尺寸满足奈奎斯特采样定律时,成像系统的分辨率最终由成像系统的孔径大小(所对应艾里斑的尺寸)所决定。在波长一定的情况下,只有

增大孔径才能提高成像分辨率。但是随着孔径的增大,光学系统的体积、质量和加工成本呈指数级上升,上述因素最终限制了成像系统的所能达到的极限分辨率。解决此问题的关键在于如何在非相干条件下实现合成孔径成像。

非相干合成孔径反演成像技术本质上是借助于光的波动性,即范西特泽尼克定理——非相干目标的光强分布与其远场互强度函数互为傅里叶变换。因此,只需在非相干光场的前提下实现相位复原与频谱填充,就可实现目标强度的合成孔径反演成像。非相干合成孔径反演成像基于多个分立子孔径对来自目标的各方向散射光进行收集,然后通过分时合成重建出大口径光学成像系统才能达到的超分辨成像效果。该方法通过自相关探测系统分别从不同角度对目标进行分立记录,然后通过傅里叶叠层相位恢复算法计算各子孔径下的复振幅分布,并在后期的数字重建过程中进行子孔径的迭代合成,最终使成像系统的

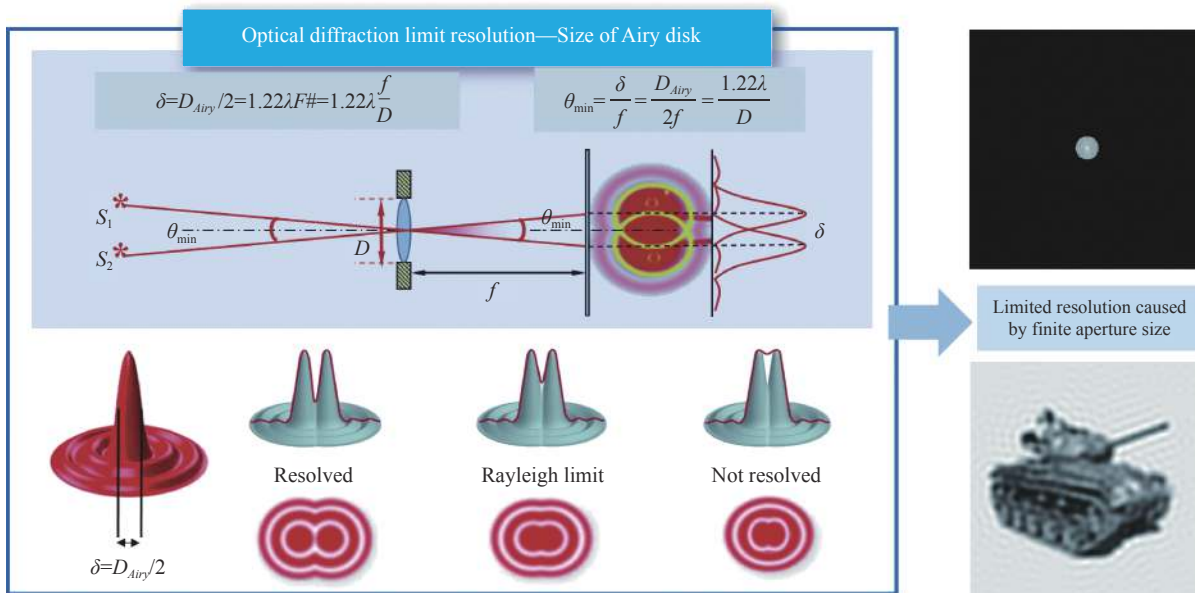


图 7 光学系统口径所限制的衍射分辨极限 (艾里斑)。(a) 成像系统的最小可分辨距离 (光学角分辨率) 与成像系统的口径成反比; (b)~(d) 两个非相干的点目标在不同间距下所能拍摄到的艾里斑图像

Fig.7 Diffraction resolution limit limited by the aperture of optical system (Airy spot). (a) The minimum resolvable distance (optical angular resolution) of the imaging system is inversely proportional to the aperture of the imaging system; (b)~(d) Airy spot images of two incoherent point targets at different distances

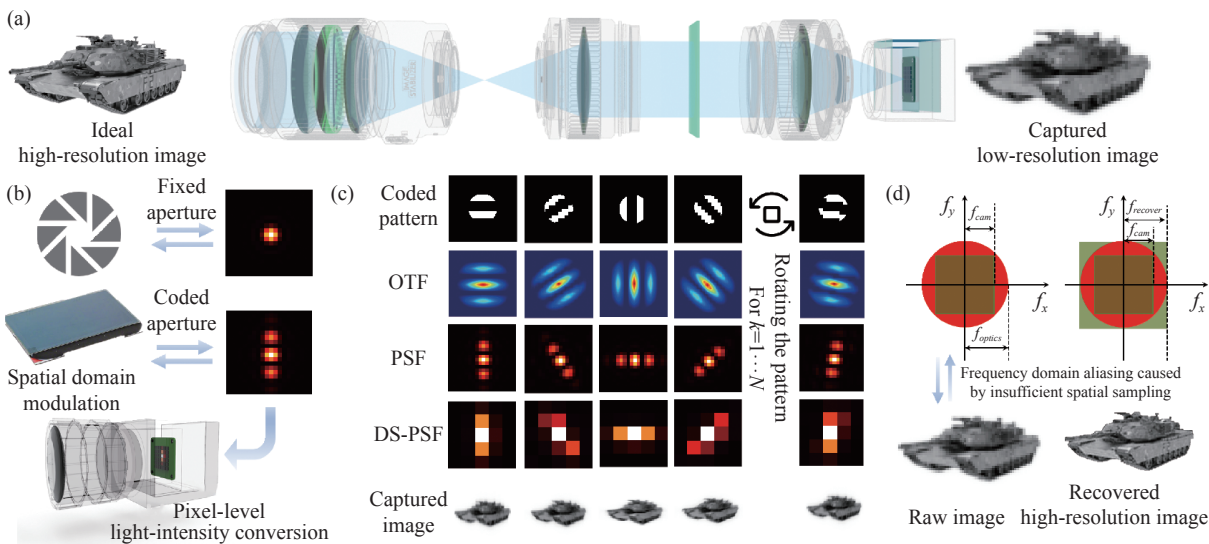


图 8 基于孔径编码像素超分辨成像原理。(a) 成像系统光路结构示意图; (b) 经过孔径编码调制后的点扩散函数与传统固定孔径成像对比; (c) 不同编码下光学传递函数与点扩散函数分布; (d) 由探测器空间采样不足所导致的频域混叠现象与孔径编码反演成像后的解调图像

Fig.8 Principle of coded aperture pixel super-resolution imaging. (a) Schematic diagram of optical path structure of imaging system; (b) The point spread function modulated by coded aperture is compared with the traditional fixed aperture imaging; (c) Distribution of optical transfer function and point spread function under different patterns; (d) Frequency domain aliasing caused by the insufficient spatial sampling of the detector and demodulated image after coded aperture constructive imaging

分辨能力获得大幅提升, 整个方法的实现流程如图 10 所示。

非相干合成孔径技术需要采用多个子孔径从不同角度收集来自目标的入射光。为了避免机械移动,

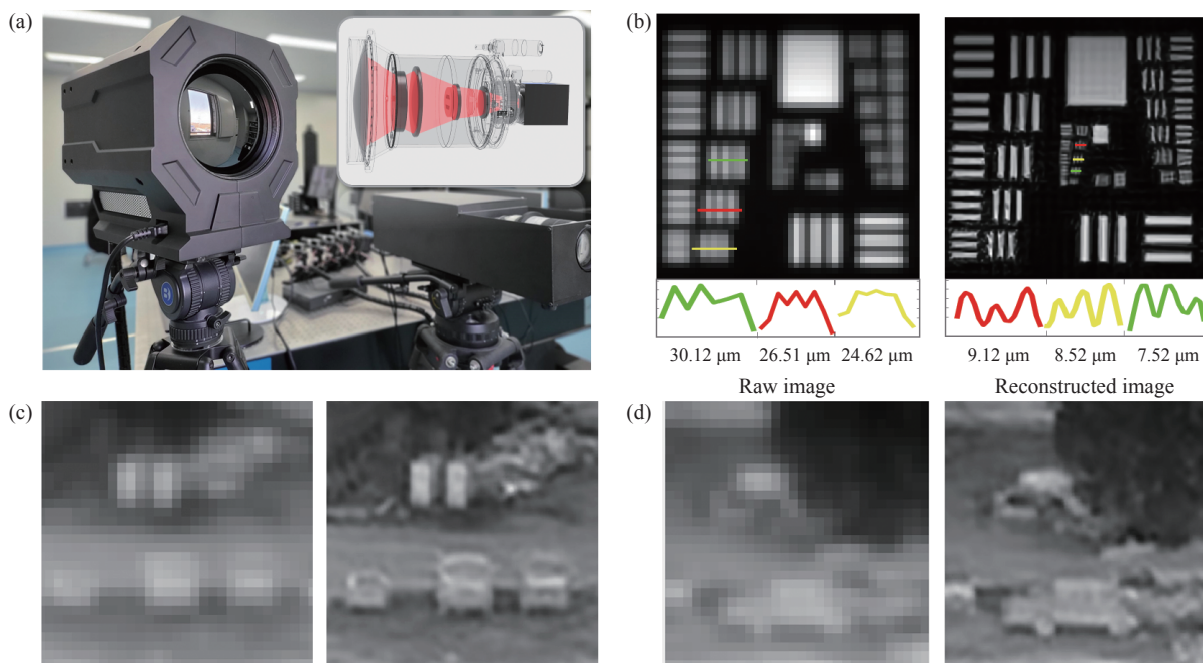


图 9 基于孔径编码的像素超分辨成像技术的典型实验结果。(a) 长波红外成像系统对标准分辨率靶标成像测试; (b)-(d) 采用像素超分辨算法对 USAF 靶标及远距离车辆前后成像效果对比

Fig.9 Typical experimental results of coded aperture-based pixel super-resolution imaging technique. (a) Long-wave infrared imaging system for standard resolution target imaging test; (b)-(d) Comparison of imaging resolution before and after applying pixel super-resolution algorithm on USAF target and vehicle results

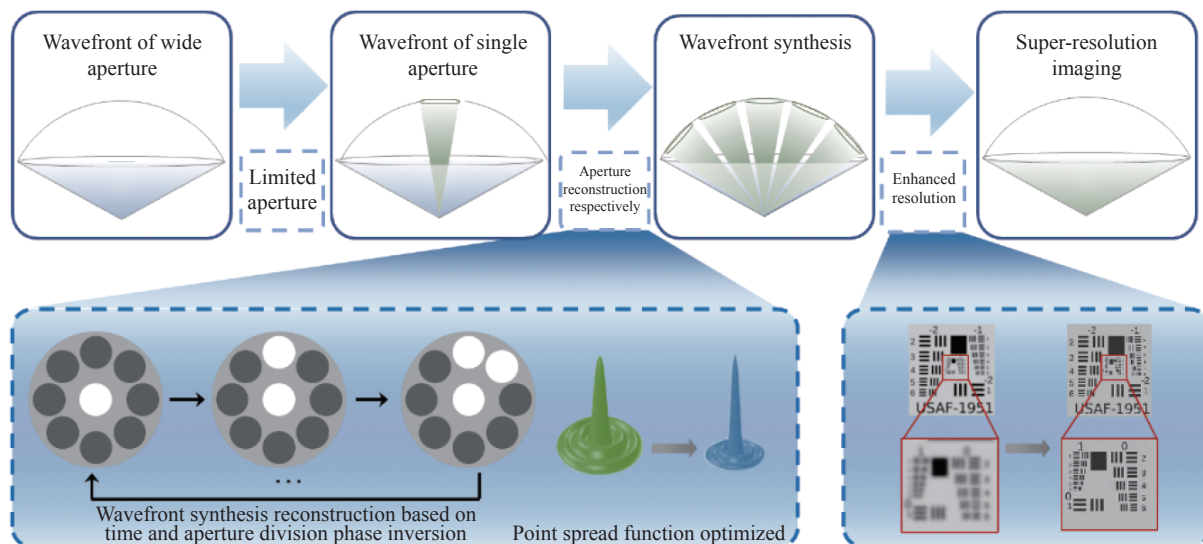


图 10 非相干合成孔径技术原理。(a) 实现点扩散函数优化的分时孔径相位反演合成重建示意图; (b) 基于分时孔径相位反演合成孔径实现点扩散函数优化; (c) 超分辨前后成像对比

Fig.10 Principle of incoherent synthetic aperture technology. (a) Process for synthetic aperture super-resolution imaging; (b) Point spread function optimization based on time and aperture division synthetic aperture of phase reconstructive; (c) Image comparison before and after super resolution

可采用扫描振镜对光束入射角扫描,从而大幅提升图像采集效率。图 11 展示了利用非相干合成孔径反演成像技术对非相干照明下的 USAF 分辨率靶标的成像结果。实验结果表明,非相干合成孔径反演成像技

术可以基于叠层重建算法将分立小孔径成像系统所获取的低分辨率图像合成为大孔径高分辨率图像,有效地将光学成像系统的分辨率提升至光学衍射极限的 4 倍,实现了非相干超衍射极限分辨成像。

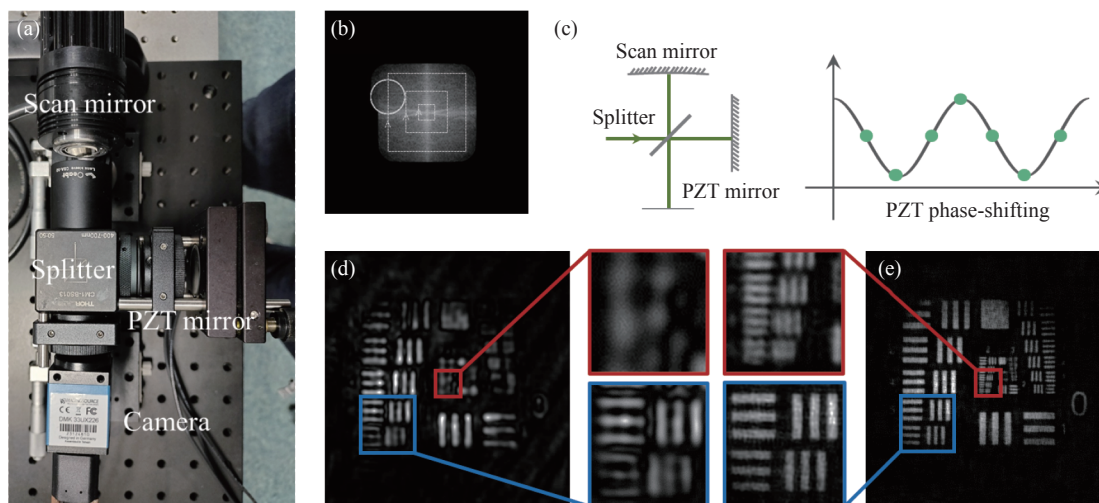


图 11 非相干合成孔径超分辨成像技术实验装置与成像结果。(a) 非相干合成孔径实验系统;(b) 傅里叶叠层扫描频谱拓展;(c) 基于 PZT 相移的单孔径自相关波前复原;(d) 单孔径自相关成像以及细节效果;(e) 非相干合成孔径超分辨成像以及细节效果,实现了光学成像系统衍射极限 4 倍的超分辨成像

Fig.11 Experimental equipment and imaging results of incoherent super-resolution imaging technology. (a) Experiment setup of the incoherent synthetic aperture; (b) Spectrum scanning expansion based on Fourier ptychography; (c) Single-aperture self-correlation wavefront restoration based on PZT phase-shifting; (d) Single-aperture self-correlation imaging and details; (e) Incoherent synthetic aperture super-resolution imaging and details, achieving super-resolution imaging corresponding to 4 times diffraction limit of the optical system

5 结论与展望

在军事需求牵引和光电成像器件发展的推动下,夜视成像技术与装备性能得到了迅速的发展。未来的军事应用要求夜视成像系统能同时实现高灵敏度和高分辨率成像,而未来的先进夜视技术将基于光电转换的光强直接成像与基于计算成像的信号反演成像两条脉络并行向前迈进。传统“光强直接成像”与基于计算光学成像的“信号反演成像”二者的结合为夜视成像技术下一阶段的发展提供崭新的思路,这也是我们目前研究的重点方向。文中所展示的前期阶段性研究成果让我们坚信:沿着该方向坚持不懈的探索,将有望打破夜视成像系统灵敏度与分辨率之间的

制约,建立夜视成像技术新机制,形成自主可控的新型夜视器件,推动我国夜视技术与装备的跨越式发展。

值得说明的是,当前新兴的光电功能材料与基于微纳结构的光场调控机制可增强光电探测器对光子的吸收能力,这有望进一步提升器件的探测灵敏度。此部分工作因篇幅限制,在此不作赘述。另一方面,当前新型光电成像机理与方法仍在不断涌现,我们也将持续密切关注并探索这些新技术在夜视领域的前沿应用。此外,这里我们仅简略阐述了基于计算光学夜视成像技术的若干研究进展。更多有关计算光学成像的内容,请参阅本期《红外激光工程》——“南京理工大学”专刊我们所撰写的长篇综述论文“计算光学成像:何来,何处,何去,何从?”。