

微光视频器件及其技术的进展

金伟其^{1,2}, 陶禹^{1,2}, 石峰¹, 李本强³

- (1. 微光夜视技术重点实验室, 陕西 西安 710065;
2. 北京理工大学光电学院光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081;
3. 北京洪润康光电工程技术有限公司, 北京 100085)

摘要: 微光夜视技术作为当今拓展人眼夜间视觉感知的主要技术之一, 在军事和民用领域都有广泛的应用。随着数字图像处理技术的发展, 微光视频器件为通过图像处理进一步提升夜视图像质量, 为与红外热成像的图像信息融合, 为提高夜间对目标探测/识别和场景理解能力等方面提供了广阔空间, 成为当前国内外夜视技术发展的重要方向之一。论文综述了微光视频器件发展, 分析了电真空+固体微光视频成像器件(如像增强 CCD/CMOS(ICCD/ICMOS)器件、电子轰击 EBCCD/EBCMOS 器件等)、全固体微光视频成像器件(如电子倍增 CCD 器件、超低照度 CMOS 器件等)的特点和发展趋势, 并结合法国 PHOTONIS 公司的 LYNX 计划, 对微光夜视技术的发展进行了分析和讨论。

关键词: 微光; 视频器件; 进展; EBCCD/EBCMOS; EMCCD; CMOS

中图分类号: TN223 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)11-3167-10

Progress of low level light video technology

Jin Weiqi^{1,2}, Tao Yu^{1,2}, Shi Feng¹, Li Benqiang³

- (1. Science and Technology on Low-light-level Night Vision Laboratory, Xi'an 710065, China;
2. MOE Key Laboratory of Optoelectronic Imaging Technology and System, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;
3. Beijing HRK Photoelectric Engineering Co., Ltd, Beijing 100085, China)

Abstract: As one of the key technologies to expand human eye's night visual perception, low level light (LLL) night vision technology has wide application in military and civilian fields. With the development of digital image processing technology, LLL video devices not only improve the night vision image quality through the image processing, but also provide a broad space for image information fusion with the infrared thermal imaging and the improvement of nighttime target detection/recognition, scene understanding ability and so on, become one of the important directions of current night vision technology both at home and abroad. This paper reviews the development of LLL video devices, analyzes the characteristics and development trends of electronic vacuum + solid LLL video imaging devices (such as ICCD/ICMOS, Electron Bombardment EBCCD/EBCMOS, etc.), all solid-state LLL video imaging devices (such as electron multiplying EMCCD, Extreme Low-Light CMOS, etc.), analyzes and discusses the development of LLL night vision technology combined with PHOTONIS LYNX program.

Key words: low level light; video devices; progress; EBCCD/EBCMOS; EMCCD; CMOS

收稿日期: 2015-03-05; 修订日期: 2015-04-10

基金项目: 微光夜视技术重点实验室基金(9140C380503120C38148); 国家自然科学基金(61231014)

作者简介: 金伟其(1961-), 男, 教授, 博士, 主要从事光电图像处理、夜视与红外技术、光电检测与仪器方面的研究与教学。

Email: jinwq@bit.edu.cn

0 引言

微光夜视技术作为当今拓展人眼夜间视觉感知的主要技术之一^[1-2],不仅在军事上具有广泛的应用,而且在民用领域也日趋受到重视,已逐渐深入到人们社会和生活之中。在微光夜视技术的发展伊始,诸如像增强器和变像管之类(通称为像管)的直视微光器件与诸如光电导摄像管、硅增强靶摄像管等微光视频器件并驾齐驱,竞相发展。目前,直视型像增强器已发展了高性能超二代、三代和四代像增强器;而随着以 Si-CCD/CMOS 为代表的固体成像器件的发展,全电真空的低照度摄像管已退出电视型微光视频器件市场,以电真空+固体成像器件(如像增强 CCD/CMOS (ICCD/ICMOS) 器件、电子轰击 EBCCD/EBCMOS 器件等),甚至全固体微光成像器件(如电子倍增 CCD 器件、超低照度 CMOS 器件等)所取代;此外,短波红外波段也进入微光夜视技术的领域。随着数字图像处理技术的发展,微光视

频器件不仅为通过图像处理进一步提升夜视图像质量,而且为与红外热成像的图像信息融合,为提高夜间对目标探测/识别和场景理解能力等提供了广泛的空间,进而成为当前国内外夜视技术发展的重要方向之一。文中将综述微光视频器件的发展,分析微光视频典型的图像处理技术,并提出相关的发展设想。

1 微光视频器件及其技术

微光夜视技术是利用光电成像器件及其相关技术,实现在夜晚低照度条件下基于目标景物反射特性的成像技术。目前微光夜视技术主要应用的波段有:可见光、近红外和短波红外波段。为了更有效地划分各种微光或低照度成像条件,国外将夜间光照大致分为 5 个等级(如图 1 所示)^[3],其中将等级 2 和等级 3 称为低照度,等级 4 和等级 5 成为超低照度条件。下面分类大致描述各类微光视频夜视技术的现状及发展趋势。

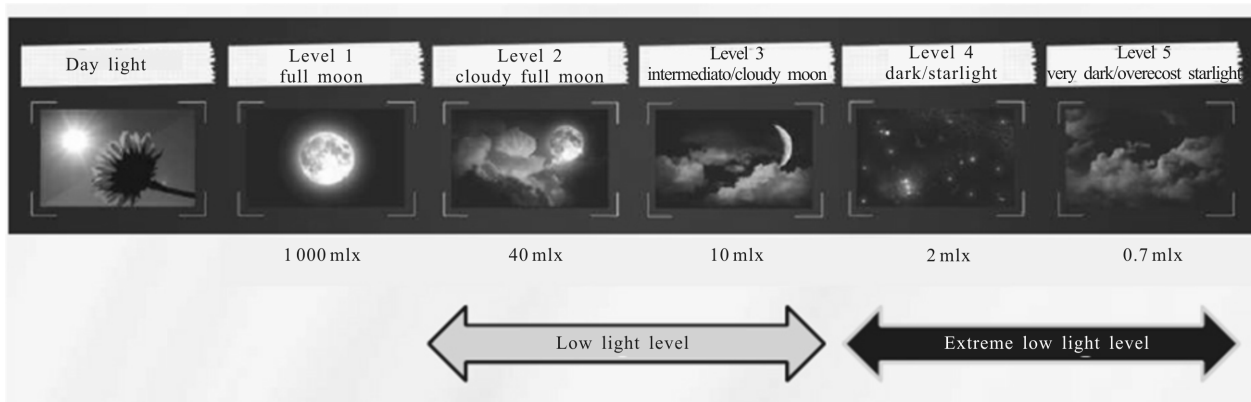


图 1 夜间照明条件的等级

Fig.1 Grades of nighttime lighting conditions

1.1 像增强 CCD/CMOS(ICCD/ICMOS)

直视像增强器和变像管技术从 20 世纪 30 年代银氧铯光阴极应用突破后起步,于二次世界大战中进入以玻璃结构特征的零代微光技术;60 年代进入以铯钾钠铯多碱光阴极和光纤面板等为技术特征的一代微光像增强器;70 年代以微通道板为技术特征进入二代微光像增强器;80 年代以镱砷负电子亲合势光阴极为标志进入三代微光像增强器;90 年代通过借鉴部分三代技术实现传统二代微光器件的性能飞跃,获得了超二代像增强器。同时,三代像增强器

通过阴极工艺优化,使得灵敏度得到明显提高,发展了超三代像增强器;目前通过优化光阴极结构和微通道板结构、无离子反馈膜以及自动门控电源等技术研究进入了四代像增强器发展阶段^[2,4-6]。

目前高性能超三代/四代像增强器(美国)和高性能超二代像增强器(欧洲)是当前国际上性能最佳的微光像增强器,积分灵敏度达 1 800~2 000 A/lm(高性能超三代)及 800 A/lm(高性能超二代)以上,分辨率达 64 lp/mm 以上,信噪比达 26 以上^[4-6]。

随着模拟/数字视频 CCD 和 CMOS 成像技术的

发展,像增强器与 CCD/CMOS 结合的 ICCD/ICMOS 仍然是目前发展迅速、应用广泛、工作照度最低的微光视频器件模式,是当前微光视频器件的主流模式,特别是高速电子快门选通成像模式更是目前固体微光视频器件难以匹敌的领域。

1.2 固体低照度光电成像视频器件

早期通过真空摄像管技术已成功获得低照度条件下(如美国阿波罗登月)的视频成像。20 世纪 60 年代末提出固体成像器件的概念后,真空摄像管技术逐渐退出历史舞台,70 年代中期 Si-CCD 固态光电成像技术进入实用化,90 年代进入大面阵 CCD 的时代以及 CMOS 面阵探测器产生,单个像元尺寸进一步缩小,器件的成像分辨率得到很大提高。同时,为了适应低照度下的光电摄像,目前 CCD/CMOS 成像器件都有了明显的进步。

1.2.1 低照度 CCD 技术

20 世纪 80 年代初,SONY 公司研究了用于可变电子快门产品的 HAD (Hole-Accumulation Diode) 技术,提高了 CCD 的灵敏度,在拍摄移动快速的物体也可获得清晰的图像;80 年代后期发展了片上微透镜(ON-CHIP MICRO LENS)技术,在 CCD 受光面积减少的情况下,以微透镜技术提高探测器的灵敏度;90 年代后期提出 SUPER HAD CCD,通过优化微透镜形状,进一步提升光利用率;1998 年开发的“EX-VIEW HAD CCD”技术,提高了 CCD 在近红外波段的响应,并使其灵敏度大幅地提高,在低照度环境(等级 1)下可得到高清晰的成像。图 2 给出美国 ITT 公司星光级 CCD 的夜视成像效果,其在有局部强光(灯光)条件下,成像效果优于 ICCD(动态范围较小)。



图 2 美国 ITT 公司星光级 CCD 和普通 ICCD 的夜视成像对比
Fig.2 Comparison of night vision imaging between ICCD and the ITT company's star level CCD

1.2.2 低照度 CMOS 技术

与 CCD 不同,CMOS 成像器件采用晶体管开关

实现光电探测器信号的读取^[7]。如图 3 所示,传统的 CMOS 器件是无源像元传感器 PPS (Passive Pixel Sensor),随着 CMOS 工艺技术的发展,有源像元图像传感器 APS(Active Pixel Sensor)成为提高 CMOS 成像器件的里程碑技术。在 PPS 中,光电二极管输出的光电流信号直接通过开关晶体管传输到列总线上,在传输之前未经任何处理。

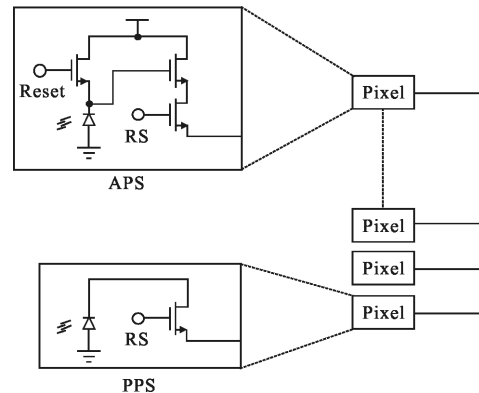


图 3 CMOS 的 APS 及 PPS 结构

Fig.3 Structure of APS and PPS in CMOS image sensor

在 APS 中,光电二极管产生的光电流在其分布电容上积分,通过源极跟随器缓冲及开关晶体管后再传输到列总线上。通过光电流积分后,光电信号的信噪比得到极大的增强,同时经过缓冲后的电压信号更有利于多路传输。

1.2.3 背照度 CCD/CMOS 技术

背照明 BCCD/BCMOS 技术是在传统 CCD/CMOS 器件基础上,通过减薄技术,将感光层和电极层换位,使入射辐射从背面感光层直接进入半导体完成光电转换并进入势阱,从而减小电极层的能量损耗,提高探测器的量子效率,为高灵敏度 CCD/CMOS 开辟了新的技术途径。

1.2.4 电子倍增 EMCCD 技术

EMCCD(Electron Multiplying CCD)是利用 CCD 器件电荷转移过程中的雪崩倍增机制,实现微弱信号的放大,也被称作“片上增益”技术,2001 年实现了原理验证。之后美国 TI 公司和英国 E2V 公司相继推出“Impactron-CCD”和“L3CCD”产品。虽然在电子倍增 CCD 中,每次转移的倍增只有 $1.01^* \sim 1.015^*$,但当该过程重复相当几千次后,信号可实现 1000 倍以上的增益,使得信号电荷得到明显的增益,可用于昼间和环境 $10^{-3}lx$ 以上(等级 3)的低照度成像。EMCCD

有前照式和背照式 CCD 之分,两者最低工作照度约差 1 个数量级,探测器工作时需要 TEC 制冷,以减小热噪声的影响。图 4 给出某小型化 EMCCD 摄像头。目前,国内市场可购置 EMCCD 芯片及系统,并在诸多领域获得有效的应用。同时国产 EMCCD 的芯片已取得重要的突破,器件驱动、制冷和图像处理等关键技术也已取得进展,国产化的 EMCCD 成像系统可望达到实用化。

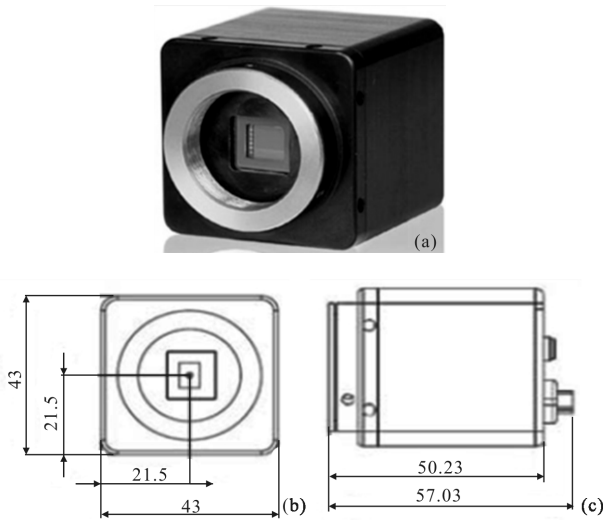


图 4 小型化 EMCCD 探测器
Fig.4 Miniaturized EMCCD detector

1.2.5 超低照度 CMOS 技术

2013 年以来,欧洲 PHOTONIS 在传统 CMOS 成像器件基础上,通过探测器结构以及微小信号处理等优化技术,使 CMOS 灵敏度得到提高,研发出超低照度 CMOS 成像器件 NOCTURN(如图 5 所示,像元数 1280×1024 ,像元尺寸 $9.7 \mu\text{m}$,动态范围大于 60 dB,读出噪声小于 $4e^{-}$)^[3,8-10],最低工作照度拓展到三级夜天光(10^{-3}lx),图 6 给出在实验室的实验图像,虽然最低工作照度较 EMCCD 稍逊,但无需制冷,器件体积、重量和功耗更小,因此,超低照度 CMOS 成像系统在单兵武器、无人机等领域展现出广泛的发展和前景(如图 7 所示)。需要指出:PHOTONIS 公司对其超低照度 NOCTURN 的原理介绍一直较为谨慎,往往停留在“对 CMOS 器件的特殊设计”描述。2014 年 PHOTONIS 推出了 NOCTURN3 低照度彩色 CMOS,最低工作照度较普通彩色 CMOS 约低一个数量级,但较黑白 NOCTURN 约高一个数量级。

2013 年 6 月,美国 SiOnyx 公司推出一种超高灵敏度的微光摄像机 XQE (Extended Quantum Efficiency)系列^[11],并通过美军的关键性能试验。

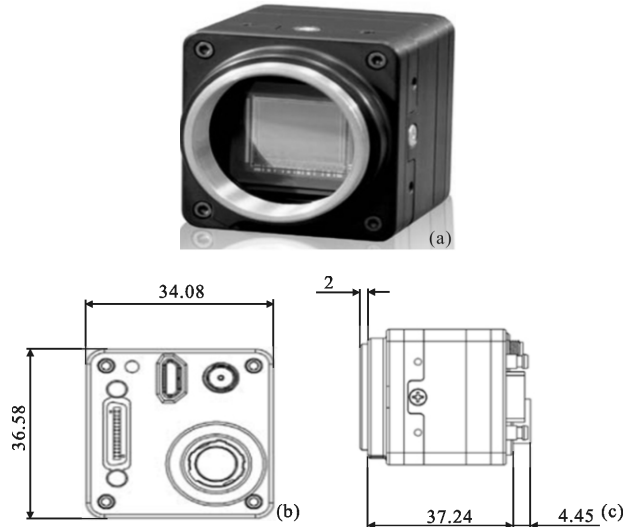


图 5 NOCTURN 超低照度 CMOS 探测器

Fig.5 NOCTURN digital extreme low-light CMOS detector

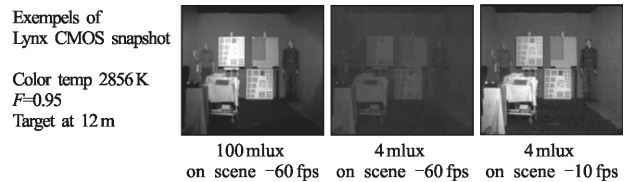


图 6 NOCTURN 的实验室成像效果

Fig.6 Laboratory imaging effect of NOCTURN

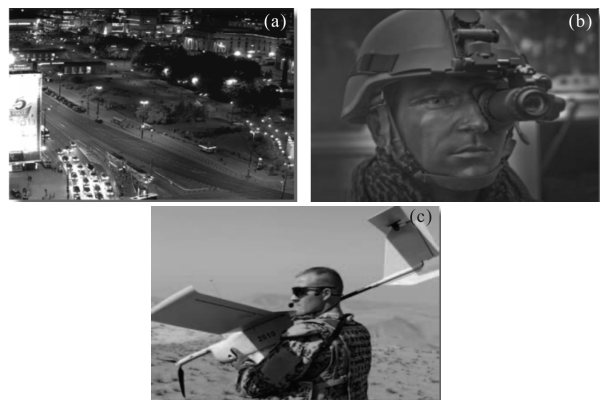


图 7 超低照度 NOCTURN 的应用

Fig.7 Applications of the NOCTURN digital extreme low-light CMOS detector

这种基于 10 μm 工艺的超低照度 CMOS 成像器件采用了黑硅材料 (表面呈微突系列排列的硅材料, 哈佛大学专利), 具有对可见光和近/短波红外敏感、光电转换效率高 (如图 8 所示, 在 1 064 nm 处比传统硅基微光探测器高 10 倍, 可有效探测对应波长的激光源) 的特点。图 9 给出 XQE CMOS 相机在实验室和野外场景成像效果图像。

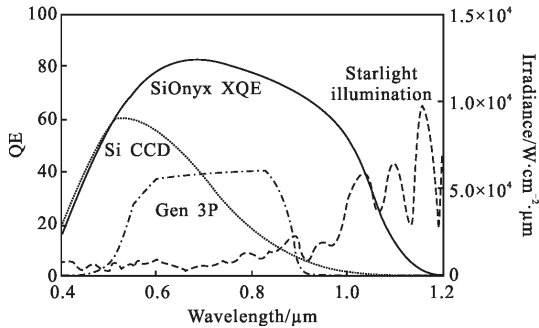


图 8 XQE CMOS 器件的量子效率

Fig.8 Quantum efficiency of XQE CMOS detector

目前 EMCCD 和超低照度 CMOS 成像器件普遍被人们所看好, 在低照度和超低照度下微光夜视成像领域具有广泛的应用和发展空间。图 10 给出 PHOTONIS 公司所述的低照度 CCD、EMCCD 和 NOCTURN 成像器件的夜视照度适应范围^[3]。

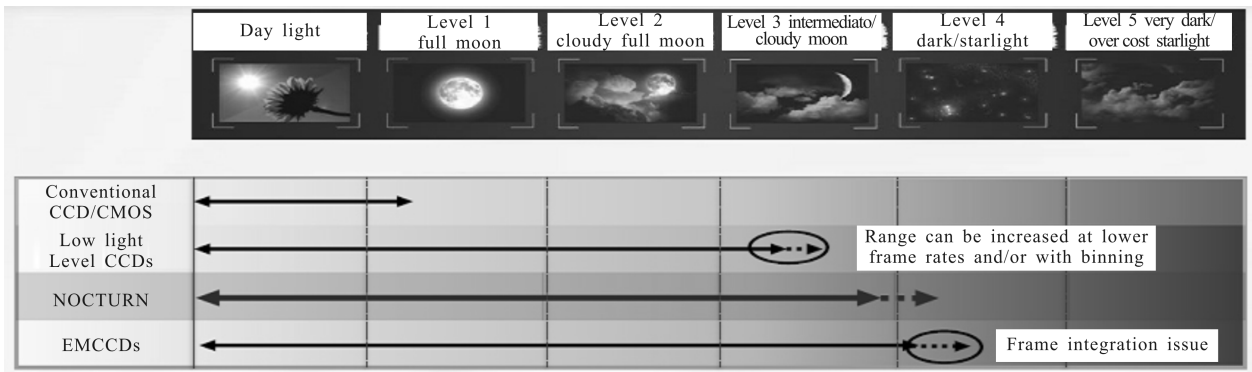


图 10 低照度 CCD、EMCCD 和 NOCTURN 探测器的夜视照度适应范围

Fig.10 Night vision illumination scopes of the low-light CCD, EMCCD and NOCTURN detector

1.2.6 短波红外焦平面探测器技术

近年来基于 InGaAs 的焦平面探测器在夜视技术领域展现出良好的发展趋势^[14-17], 目前常见的短波红外焦平面探测器主要有 HgCdTe 和 InGaAs。HgCdTe 材料的响应波长范围最宽, 可扩展到 3 μm 甚至更长, 便于制造单片大像素规模的短波红外焦平面阵列, 但需要制冷。In_{1-x}Ga_xAs 是一种 III-V 族化合物半导体合金材料, 光谱响应随合金组分值的不同

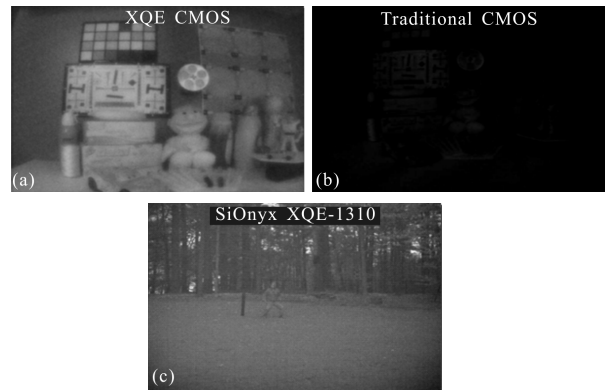


图 9 XQE CMOS 系统在实验室和野外的成像效果图像

Fig.9 Night vision performances of XQE CMOS system in laboratory and outdoor

需要指出, 近年来国内 CMOS 成像器件技术得到迅速的发展, 已获得与国外水平相当的超低照度 CMOS 成像器件。昆山锐芯微电子有限公司^[12]、长春长光辰芯光电技术有限公司^[13]等均报道了所研制的超低照度 CMOS 成像器件产品, 这些产品虽然设计的应用背景有所差异, 但均实现低照度等级 3 的夜间成像, 实验室和野外实验效果均达到甚至超过 NOCTURN 的效果, 增加制冷可获得更低的图像噪声。

同在 0.87(GaAs)~3.5 μm(InAs)范围内变化, 在非制冷条件下具有较高的探测率 (在温度远高于 HgCdTe 的工作条件下, 品质因子仍可高出接近 1 个数量级, 降低工作温度, InGaAs 的品质的增幅比 HgCdTe 更为明显), 在缩小红外系统体积、降低功耗和成本、提高可靠性方面具有明显的优势, 但响应波长范围相对较窄。目前国内可获得国外 InGaAs 短波红外相机产品, 具有较好的成像质量 (如图 11 所示)。国内

InGaAs 焦平面探测器已取得重要突破,获得了稳定的短波红外成像。

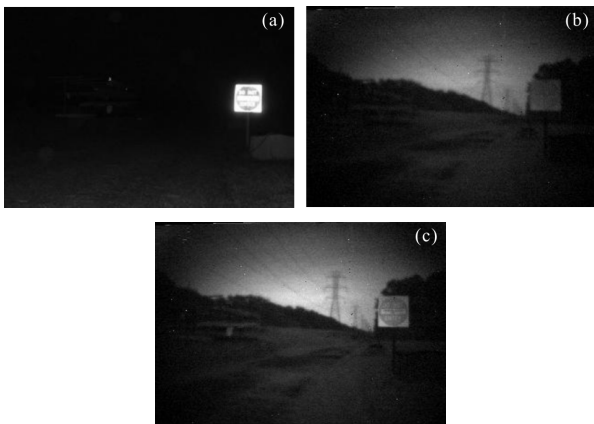


图 11 可见光、短波红外与可见-短波红外夜视图像对比

Fig.11 Night vision performance comparison between visible, SWIR and visible-SWIR imaging

1.3 真空+固体微光视频成像器件

电子轰击 CCD (EBCCD)/CMOS (EBCMOS)/APS(EBAPS, 电子轰击有源器件)是一种高性能的微光视频成像器件^[1,18],其在像增强器荧光屏位置直接耦合 CCD /CMOS /APS, 通过高能光电子→电子的倍增模式, 实现低照度光电图像的倍增。由于去除 MCP 倍增就可达到足够的增益,因此,噪声较低,是一种低噪声的光电图像增强器件。

图 12 给出传统倒像式 EBCCD^[2]以及目前常用

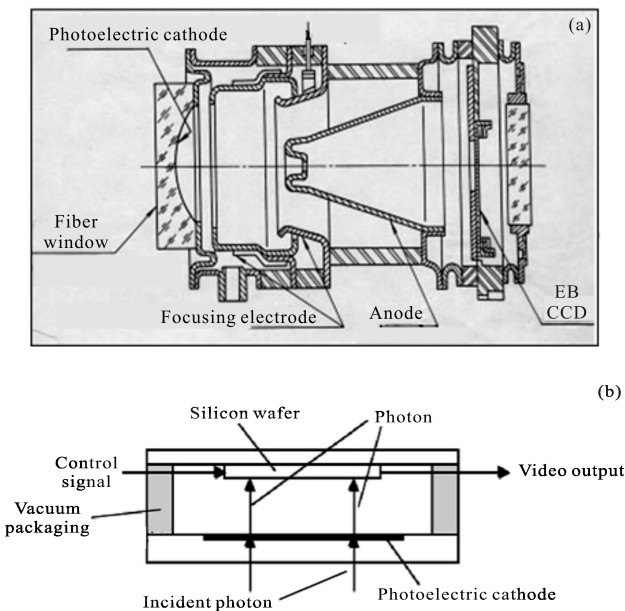


图 12 传统的电子轰击 EBCCD/CMOS/APS

Fig.12 Traditional electron-bombarded EBCCD/CMOS/APS

的近贴式 EBCCD/EBCMOS/EBAPS 器件结构图^[8]。需要指出:近年来采用 GaAs 三代光电阴极和 InGaAs 短波红外阴极的 EBCMOS/EBAPS 器件发展受到人们的关注^[17],其高灵敏度、低噪声以及纳秒级门控带来的时间和空间高分辨率等都是目前固体成像器件等无法替代的,成为超低照度微光视频成像器件发展的重要方向。

2 微光夜视视频成像的图像处理技术

微光视频成像技术的主要优势之一是数字图像处理技术的引入,为提高微光夜视的图像质量提供的广阔的发展空间和应用模式。

2.1 微光视频成像的图像预处理技术

受成像原理的限制,微光夜视图像,特别是极低照度条件下的成像大多进入了光子噪声区,因此图像的随机噪声非常严重。同时,微光夜视图像普遍存在动态范围小,图像不仅容易出现饱和,而且未饱和部分的图像往往被压缩到很小的灰度范围,很难再现场景的有效信息。因此,有效的微光视频成像应用需要首先解决这两个主要的共性问题。

2.1.1 微光视频图像的实时降噪技术

以往的微光视频降噪方法主要有空域滤波、时域滤波和时空域联合滤波^[19]。空域滤波虽然可滤除一些随机噪声,但同时也造成了图像细节的损失。时域滤波利用视频的帧间相关性,可有效实现视频降噪,但只适用于静止视频的处理,若图像中含有运动目标,则会产生严重的“拖尾”模糊。时空域联合滤波(即 3D 滤波)是目前视频降噪的研究热点,通常对背景区域采用时域滤波,仅对运动区域使用空域滤波,可有效避免“拖尾”。这种基于运动检测的时空域联合滤波方法的关键是在噪声较大的情况下准确地检测出运动区域。目前主要的运动检测方法有光流法、帧间差分法、背景差分法等。光流法计算复杂、抗噪性差,很难用于视频的实时处理;帧间差分法简单易行,但目标内部易产生空洞;背景差分法能得到运动目标准确的位置,检测到相对完整的运动像素,特别是帧间灰度变化不大的运动像素,适于固定场景观察。图 13 给出北理工对低照度 CCD 成像的 3D 图像滤波效果比较。

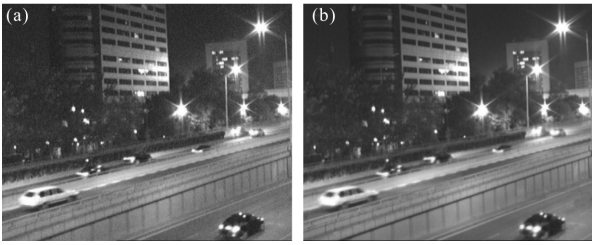


图 13 北理工低照度视频成像的降噪处理

Fig.13 Denoising processing for low-light video image by BIT

2.1.2 微光 HDR 图像增强处理技术

高动态范围 HDR (High Dynamic Range)成像是指获取超出成像设备动态范围的成像技术,目前在亮场景的彩色摄像中获得有效的应用(如图 14),在低照度成像技术中具有广泛的应用前景。HDR 成像通常有单帧(帧内)HDR 和多帧(帧间)HDR 两种方式(如图 15 所示),主要通过不同的电子曝光时间和

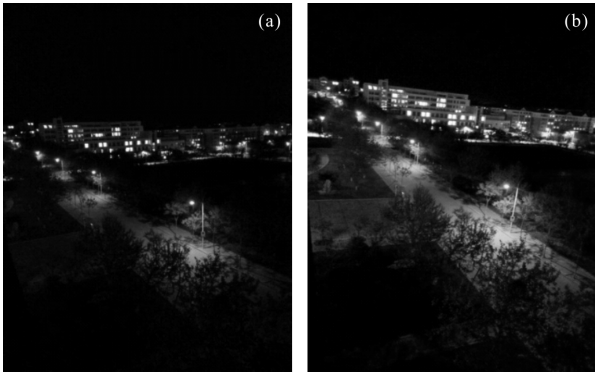


图 14 低照度情况下普通拍摄和 HDR 模式的对比

Fig.14 Performance comparison between ordinary and HDR imaging in low illumination circumstance

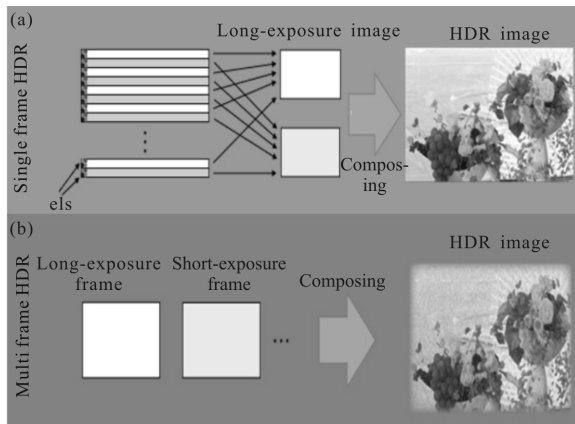


图 15 帧内和帧间 HDR 方法

Fig.15 Intra-frame and inter-frame HDR methods

相关的图像增强处理算法,采集场景不同区域的图像,进而通过数字图像处理合成的方法,实现目标场景的 HDR 成像。

微光 HDR 成像技术也可从成像器件(例如 CMOS)的特殊设计以及 A/D 转换等方面进行优化,对于 ICCD/ICMOS 成像器件,需要从像增强器增益同步控制等方面进行共同考虑。

2.2 新型微光视频成像的应用模式

数字图像处理技术的应用不仅可提高微光视频图像的质量,而且为微光夜视技术的应用提供了新的应用模式和发展空间。

2.2.1 微光与红外融合的彩色夜视技术

以多传感器技术为核心内容的战场感知已成为现代战争中最具影响力的军事高科技技术。美国国防部从 1988 年起将图像融合列为重点研究开发的 20 项关键技术之一,20 世纪 90 年代进一步提出“彩色夜视技术”概念,并将其与“图像融合技术”并列,作为在未来战争“共享黑暗”条件下,保持夜视技术领先地位的关键技术之一,部署了一系列的理论、关键技术和系统研究计划。最早投入实际使用的图像融合系统是美国陆地资源卫星(LANDSAT)。2011 年美国为 4 个“阿帕奇”武装直升机营配备了 VN-sight 可见光/近红外成像灰度融合系统,可在低照度条件下为飞行员提供先进的战术作战能力。在本世纪初开始了单兵彩色融合装备的应用(如 2002 年美国 ITT 公司采用光学融合模式 ENVG(O)技术演示硬件系统^[20],2008 年完成了首批 ENVG(O)的列装(如图 16 所示);2009 年 ITT 公司向美国陆军交付了数

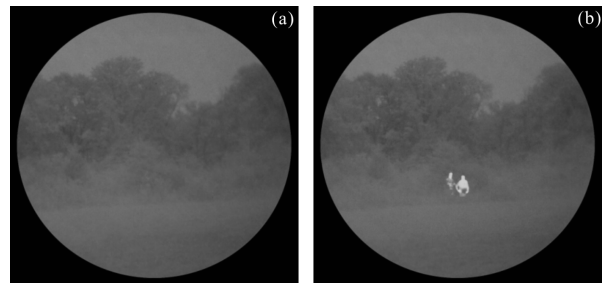


图 16 ITT 公司光学式彩色夜视

Fig.16 ITT company's optical color night vision

字融合模式 ENVG(D)样品,能与数字化战场连接,使陆战士兵能够发送和接收图像,可极大地增强态势感知能力。此外,近年以来,各种红外与微光融合

的直升机驾驶员辅助导航仪、车用驾驶仪、战场态势感知系统、单兵观察仪、融合枪瞄镜等都开始装备外军部队。

国内 20 世纪 90 年代初提出彩色夜视概念^[20],十五期间开始系统“彩色夜视技术”研究,此后,北京理工大学持续开展新型彩色夜视图像融合处理算法及其硬件电路,在彩色夜视理论、关键技术和系统应用方面取得实质性的突破,已实现数字式彩色夜视技术的装备应用(如图 17 所示)^[20]。

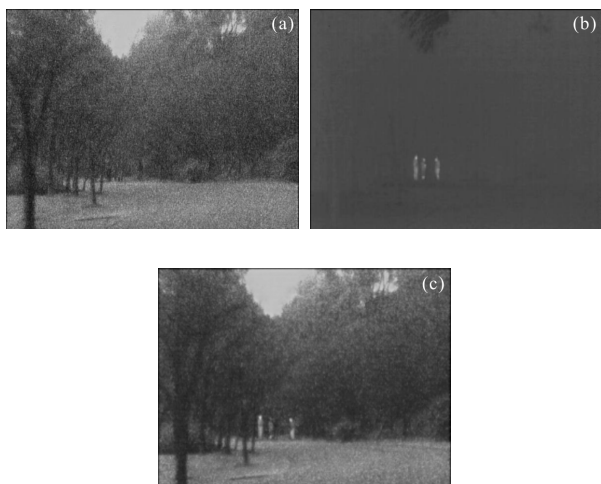


图 17 北理工数字式彩色夜视

Fig.17 BIT's digital color night vision

国内外对彩色夜视技术的性能已进行了研究、试验测试和分析比较,比较典型的有:

(1) 荷兰 DEP 公司利用其像增强器技术的雄厚实力,从 80 年代后期开始研制彩色微光夜视系统,其典型产品为 CII 彩色微光夜视仪,实验表明:CII 相对单色微光夜视仪,可使目标识别速度提高 30%,识别错误减少 60%。

(2) 荷兰国家应用科学研究院(Netherlands Organization for Applied Science Research,TNO)人力因素研究所(Human Factors Research Institute)的 Toet 等通过主观评价实验来测试融合图像是否能增加图像细节信息,以及融合图像是否有利于观察者对目标的探测和定位,即“事态意识”。实验表明,与单波段图像相比,融合图像有助于提高目标探测的准确度;恰当的彩色融合图像较之于其他测试图像表现出明显的优势,但是不恰当的彩色融合会降低图像质量;对于大部分测试任务,灰度融合提高了视觉质

量,优于单波段原始图像。

(3) 美国 ITT 公司针对红外与微光图像融合观测仪、红外夜视仪、微光夜视仪做了相应的对比测试,测试结果表明:系统探测性能:融合观测仪的目标探测速度提高 30%,识别概率可提高到 80%;识别的准确性:融合观测仪的目标识别错误减少 60%。

(4) 国内彩色夜视装备野外试验表明:彩色夜视驾驶仪相对微光和非制冷热成像夜视驾驶仪,可使驾驶轮式装甲车在夜间野外的平均速度提高 60%,明显提高部队夜间机动能力,减轻驾驶员的操作疲劳,同时,对地面状态、河流边沿等的判断能力明显提高,场景理解能力提高,可明显减小车辆驾驶事故的发生。

2.2.2 激光距离选通成像技术

高速电子快门是像增强器独特的性能,不仅使其在高速摄影领域获得重要的应用,而且在诸如水下成像、恶劣天气等条件下的主动激光距离选通成像获得广泛的应用。随着 EBCCD/EBCMOS 成像技术的发展,不仅微光(+近红外)选通成像技术获得广泛的应用,而且基于短波红外阴极的 EBCCD/EBCMOS 技术也成为人们关注的重点。

2008~2009 年德国 RIOPR(Research Institute for Optronics and Pattern Recognition)和瑞士国防研究中心(FOI)采用美国 Intevac 公司 LIVAR (Laser Illuminated Viewing and Ranging) 120 型 TE-EBCCD 和 400c 型 TE-EBCMOS 短波红外相机(如图 18 所示)进行了非视域成像(如图 19 所示)、双基成像(如图 20 所示)等新型激光距离选通成像实验^[21-22],取得了一些有益的结果。北理工自 2011 年开始对基于激光距离选通的非视域成像理论和关键技术进行了深入的研究,取得了重要的研究进展。

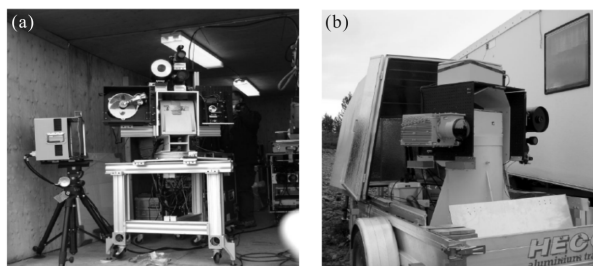


图 18 德国和瑞士研制的激光距离选通成像系统

Fig.18 Range-gated viewing system of Germany and Switzerland

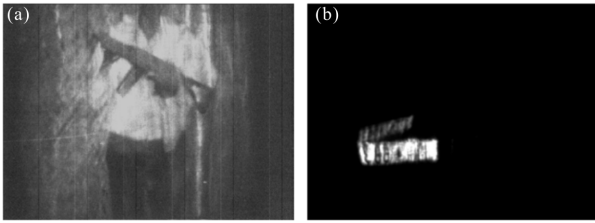


图 19 人和车牌的非视域成像实验图像

Fig.19 Non line of sight imaging for person and a license plate

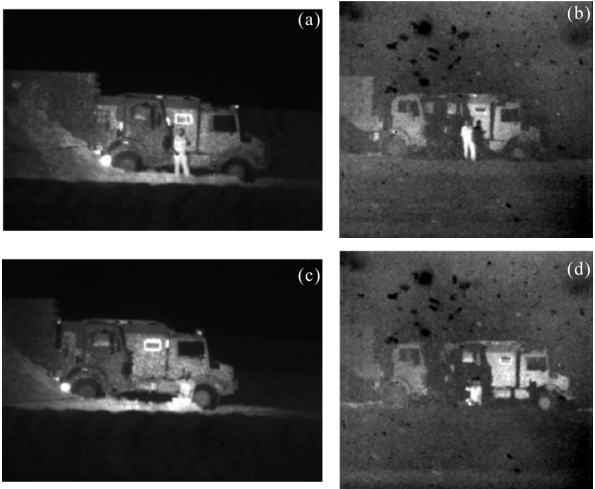


图 20 两组不同成像位置的双基成像模式场景图像
(第(a)、(c)幅 Camera 1,第(b)、(d)幅 Camera 2)

Fig.20 Two different situations as seen by Camera 1 (1st and 3rd image from left) and Camera 2 (off-axis; 2nd and 4th image from left) showing the appearance of shadows

3 关于微光视频成像技术的发展

伴随着红外成像技术的发展和挑战,微光夜视器件与技术的发展是当前国内外重点思考的问题。这里首先是微光夜视器件的发展,特别是微光视频器件的发展至关重要,应特别关注与之紧密关联的视频图像预处理技术,以及新型应用模式及其图像处理技术的研究。

PHOTONIS2010年启动了 LYNX 计划^[3],目的是开发适合超低照度条件下便携应用的数字成像传感器,特征是单光子探测能力、高灵敏度、极低功率(非制冷)和中等水平帧频(>60 fps)。图 21 给出 LYNX 计划对器件发展的指导思想:对于直视型微光器件,低照度等级 2 和 3 条件选择标准像增强器;极低照度等级 4 和 5 条件选择高性能像增强器;对于微光数字视频器件,低照度等级 2 和 3 条件选择低照度

CMOS 器件 NOCTURN;极低照度等级 4 和 5 条件,选择 EBCMOS 器件。

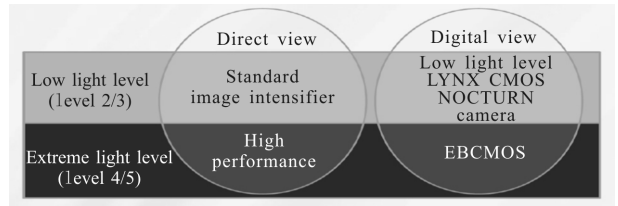


图 21 LYNX 计划的器件发展指导思想

Fig.21 Device development guide of LYNX

LYNX 计划自 2010 年启动,2012 年 5 月推出 NOCTURN 成像组件;2012 年 7 月推出 EBCMOS 原理样机;2013 年研制出 EB-NOCTURN 样品;2014 年推出彩色 NOCTURN U3 组件。图 22 给出了相关的器件和组件样品。需要指出:相对图 12 传统的 EBCCD/CMOS 器件,LYNX 计划的 EBCMOS 器件更接近于半导体成像器件,而不是真空成像器件,因此,其体积、重量、功耗以及可靠性等指标均可望得到明显提高。

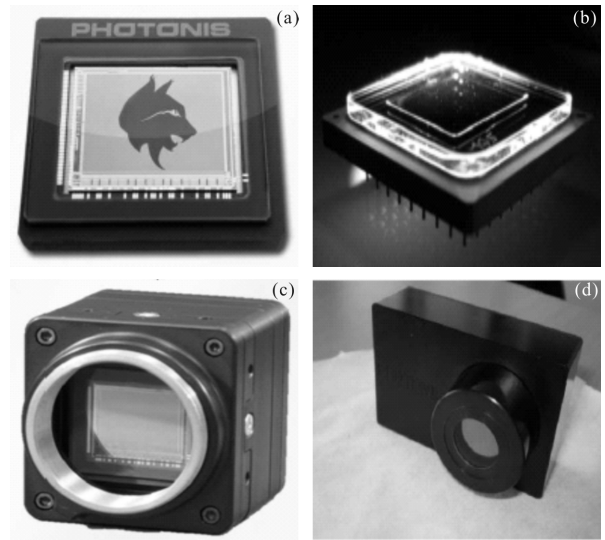


图 22 LYNX 计划研制出的器件和组件

Fig.22 Devices and components developed plan by LYNX

可以看出:LYNX 计划目标和界面清晰明确,且计划落实到位,各种目标器件不断推出,有效推进了 PHOTONIS 公司微光夜视技术的稳步发展。目前我国高性能超二代、三代微光像增强器技术已实现产业化,EBCCD/EBCMOS 工艺也取得积极进展;同时,EMCCD 器件和超低照度 CMOS 器件也取得重要的突破,初步实现了产品化;进一步结合高校在微

光视频图像处理方面的特长,充分发挥“产学研用”的力量,可望更好地形成微光夜视技术和系统研发和转化力量,促进我国微光夜视技术和装备的发展。

4 结束语

微光夜视技术在军事和民用领域都有广泛的应用,对于拓展人眼夜间视觉起到了重要的作用,不断提高微光夜视技术的水平是当前国内外研究的重要方向之一。论文综述了微光视频器件及其图像处理技术的发展,并结合法国 PHOTONIS 公司微光夜视发展 LYNX 计划,对发展国内微光夜视技术的发展提出来一些初步的看法。

参考文献:

- [1] Zhang Jingxian, Li Yudan, Jin Weiqi. Imaging Technique of LLL and Laser[M]. Beijing: Beijing University of Science and Technology Press, 1995. (in Chinese)
- [2] Zhou Liwei. Review and Development of Low-light Night Vision Technology [M]//Progress of Modern Optics and Photonics-Celebrate Academician Wang Daheng Engaged in Scientific and Technological Activities 65th Anniversary Album, Tianjin: Tianjin Science and Technology Press, 2003: 316-339.(in Chinese)
- [3] Boyd F, Chiao L. Low-light-level CMOS image sensor for digitally fused night vision systems [C]//SPIE, 2009, 7298: 729849.
- [4] Jin Weiqi, Liu Guangrong, Wang Xia, et al. Image intensifier's progress and division of generations [J]. *Optical Technique*, 2004, 30(4): 460-463. (in Chinese)
- [5] Guo Hui, Xiang Shiming, Tian Minqiang. A review of the development of low-light night vision technology [J]. *Infrared Technology*, 2013, 35(2): 63-68. (in Chinese)
- [6] Tian Jinsheng. New development of low light level imaging sensor technology [J]. *Infrared Technology*, 2013, 35(9): 527-534. (in Chinese)
- [7] Yao Libin. Low-light-level CMOS image sensor technique[J]. *Infrared Technology*, 2013, 35(3): 125-132. (in Chinese)
- [8] Intevac Photonics. E3010M Digital Image Intensifier (DI2) [J/OL]. <http://www.intevac.com>.
- [9] Photonis. Photonis Nocturn XL [J/OL]. <http://www.photonis.com>.
- [10] Franck Robert. Photonis Advanced Digital solutions for extreme low light applications [J/OL]. <http://www.photonis.com>.
- [11] Pralle M U, Carey J E, Homayoon H. IR CMOS: Infrared enhanced silicon imaging[C]//SPIE, 2013, 8704: 870407.
- [12] Brigates INC, BG0635 0605 1/2inch CMOS Digital image sensor[J/OL]. <http://www.brigates.com>
- [13] Gpixel INC, Gsense series: Gsense 400 [J/OL]. <http://www.gpixelinc.com>.
- [14] Cao Yang, Jin Weiqi, Wang Xia, et al. Development in shortwave infrared focal plane array and application [J]. *Infrared Technology*, 2009, 31(2): 62-68. (in Chinese)
- [15] Shi Yanli, Hu Rui, Zhang Weifeng, et al. Progress of InGaAs solid-state low-light devices [J]. *Infrared Technology*, 2013, 35(2): 81-88. (in Chinese)
- [16] Shi Yanli, Lv Yuzeng, Zhao Lusheng, et al. High performance solid-state and digitalized InGa_xAs low-light night vision devices [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(12): 3367-3372. (in Chinese)
- [17] Guo hui, Peng Chaxia, Jiao Gangcheng, et al. Shortwave-infrared-extended image intensifier technology and its application[J]. *Journal of Applied Optic*, 2014, 35(3): 478-483. (in Chinese)
- [18] George M. Electron bombarded back-illuminated CCD sensors for low light level imaging applications [C]//SPIE, 1995, 2415: 211-235.
- [19] Song Bo, Xu Chao, Jin Weiqi, et al. The analysis of low SNR video denoising algorithms using temporal domain and spatial domain mixture methods [J]. *Infrared Technology*, 2011, 33(8): 489-494. (in Chinese)
- [20] Luo Yuan, Wang Lingxue, Jin Weiqi, et al. Developments of image processing algorithms and systems for LLL (Vis.)/IR color night vision [J]. *Infrared Technology*, 2010, 32(6): 337-344. (in Chinese)
- [21] Endre Repasi, Peter Lutzmann, Ove Steinvall, et al. Mono- and Bi-Static SWIR range-gated imaging experiments for ground applications[C]//SPIE, 2008, 7114: 71140D-1-19.
- [22] Endre Repasi, Peter Lutzmann, Ove Steinvall, et al. Advanced short-wavelength infrared range-gated imaging for ground applications in monostatic and bistatic configurations[J]. *Applied Optics*, 2009, 48(31): 5956-5969.