

·光电系统·

美军通用红外对抗系统技术的发展

张 洁

(东北电子技术研究所, 辽宁 锦州 121000)

摘 要:简述了美军通用红外对抗发展计划及对系统的质量与模块化需求,分析了BAE系统公司、诺斯罗普·格鲁曼公司与赛莱克斯·伽利略团队、ITT电子系统公司与洛克希德·马丁公司的AcuLight分公司团队、雷声导弹系统公司、洛克希德·马丁导弹和火控系统公司与DRS公司团队参与通用红外对抗项目竞标产品的研发过程、现状与特点,介绍了竞标结果及通用红外对抗技术发展的亮点。

关键词:通用红外对抗;导弹告警;激光器

中图分类号:TN216

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2013)-01-0007-05

Development of US Military CIRCМ System Technology

ZHANG Jie

(Northeast Research Institute of Electronics Technology, Jinzhou 121000, China)

Abstract: The development plan of US military common infrared countermeasure (CIRCМ) system and the requirements of weight and modularity of the system are described. Bids for CIRCМ program among BAE Systems, Northrop Grumman and SELEX Galileo, ITT Corporation and Lockheed Martin AcuLight, Raytheon missile systems, Lockheed Martin missile and fire control system teamed with DRS Technologies are analyzed. And the development progresses, actual situation and characteristics of the product are summarized. Bid results and development features of CIRCМ technology are introduced.

Key words: common infrared countermeasure (CIRCМ); missile warning; laser

单兵便携式防空系统对在战场上低空、慢速飞行的直升机构成了巨大威胁,威胁对抗的有效性取决于干扰信号强度与目标源信号之比。过去多数作战直升机长期使用的红外干扰机是一种全向闪光灯,由于其能量分布在整个空间导致了有效的干扰能量较弱。不断发展的红外定向对抗系统因配备了激光源,采用了定向干扰,干扰能量集中且强度大大增加,成为了直升机对抗单兵便携式防空系统的最有效手段。

2009年初,美国海军陆战队先把诺斯罗普·格鲁曼公司研发的大型飞机红外对抗(LAIRCМ)系统装备在伊拉克作战的CH-53E“超级种马”大载重直升

机,然后又装备了CH-46E和CH-53D飞机。根据快速反应能力(QRC)项目,美国陆军把BAE系统公司基于激光的先进威胁红外对抗系统(ATIRCМ)进行了升级,装备到了CH-47“支奴干”大型载重直升机上。装备部署后不久,美国陆军“支奴干”直升机上的ATIRCМ就成功挫败了一次多枚导弹的攻击。同样,在装备了诺斯罗普·格鲁曼公司研发的红外定向系统后,CH-53E“超级种马”直升机可以再次进入之前因导弹威胁而无法进入的阿富汗多个地区。

虽然红外定向对抗系统已证明了其有效性和可靠性,但设备笨重、昂贵,为此,美国陆军计划研制一种性能更强、可靠性更高、综合性更好、质量更小、且

价格相对便宜、能够与AN/AAR-57(V)通用导弹告警系统和联合威胁感知系统(JATAS)兼容、可安装在陆军、海军和海军陆战队的轻型和中型直升机上,满足各军种使用要求的红外定向对抗系统,即“通用红外对抗”(CIRCM)系统。

1 通用红外对抗(CIRCM)发展计划

2010年,美国陆军发布了通用红外对抗项目技术验证阶段的提请建议初稿^[1]。通过该项目,研发一种廉价、轻型、基于激光的红外定向对抗系统,以对抗现役和未来的红外制导导弹。该系统可装备陆军的旋翼、固定翼飞机和陆军特种作战直升机,也可装备海军、海军陆战队和空军的多种飞机。

2011年2月美国陆军发布了CIRCM系统计划技术研发阶段的最终征求建议书(RFP)。根据此项计划,美国陆军要为陆军、海军和海军陆战队的旋翼飞机研发轻型红外定向对抗系统。将签署两个或多个为期21个月的技术研发合同。

2011年3月,美国陆军发布CIRCM系统合同的招标流程,提出研发的产品必须能够与直升机上的其他设备完全兼容,且能够满足各军种的使用要求。研发的目的是降低基于激光的直升机反导系统的质量和成本。

美陆军技术发展计划要求CIRCM系统的飞行试验从2012年开始。2013年年中,美陆军将发布CIRCM系统工程及制造合同,低速生产预计从2015年开始。2017年服役后,CIRCM系统将装备“阿帕奇”武装直升机、“黑鹰”通用直升机、“支奴干”重型运输直升机以及“基奥瓦勇士”武装侦察直升机的后续型等,采购数量将达到1076部^[2-3]。

CIRCM系统的竞标者包括先进威胁红外对抗系统制造商英国BAE系统公司、大型飞机红外对抗系统制造商美国诺斯罗普·格鲁曼公司和赛莱克斯·伽利略公司、已完成红外定向对抗系统飞行演示验证工作的美国ITT公司、研发“平静眼”系统的美国雷声导弹系统公司、后期参与竞标的洛克希德·马丁导弹和火控系统公司与DRS团队。

2 CIRCM系统质量与模块化需求

2.1 质量需求

美国海军、空军与陆军联合制定了CIRCM系统

的质量需求,要求装备2个转台干扰B套件的CIRCM系统的质量为85 lb。装备大型旋翼飞机(如“支奴干”和V-22“鱼鹰”倾斜翼飞机)的辅助A套件的最大质量为70 lb,装备更小型直升机(诸如配线较少的“黑鹰”)辅助A套件的质量为35 lb。与装备在CH-53E直升机上质量193 lb配有2个全向保护激光头的大型飞机红外对抗系统及装备在“支奴干”直升机上质量约160 lb的先进威胁红外对抗系统相比,CIRCM系统是一个轻型的系统。

2.2 模块化需求

CIRCM系统必须采用模块开放式系统方法(MOSA)综合干扰激光器、导弹跟踪仪和导弹告警接收机。模块开放式系统方法可使通用红外对抗系统配备多波段激光器,具备挫败未来威胁的能力。通用红外对抗系统的竞争者BAE系统公司、诺斯罗普·格鲁曼公司、ITT公司、雷声导弹系统公司已经把红外定向对抗系统或其通用红外对抗主要部件投入战场。

模块开放式系统结构支持升级并推进竞争的发展,还有助于降低风险——如果初始设备制造商(OEM)出现了问题,可绕过此制造商继续运行。即要求系统的部件有可替代产品,且易于更换。为此,诺斯罗普·格鲁曼公司的红外定向对抗系统已同BAE公司和洛克希德·马丁公司的导弹告警传感器、雷声导弹系统公司和诺斯罗普·格鲁曼公司的激光器进行了综合。

3 竞标商研发的产品与特色

美国陆军收到5家技术研发阶段的竞标,分别是BAE系统公司、诺斯罗普·格鲁曼与赛莱克斯·伽利略团队、ITT电子系统公司与洛克希德·马丁公司的AcuLight分公司团队、雷声导弹系统公司、洛克希德·马丁导弹和火控系统公司与DRS团队。

3.1 BAE系统公司研发的产品

BAE系统公司针对陆军通用红外对抗项目的竞标方案称为“果敢行动”(Boldstroke),产品的技术基础是该公司的AN/ALQ-212(V)先进威胁红外对抗项目。AN/ALQ-212(V)项目是陆军的下一代系统,原计划用于替代装备了数千架直升机的ALQ-144系统,但由于研制的不断延期且成本超出预算,除前面

提到的少量装备外,一直未能批量生产。

在2011年4月17~20日举行的美国陆军航空协会年度专业论坛及展会上,BAE系统公司首次展出Boldstroke。产品是根据先进威胁红外对抗系统的持续改进而来的,移动光学部件更少,采用反射镜代替物理“光管”发射激光。完整的单元放置在1个中等尺寸盒子里,质量约30 lb,盖有一个透明的半球罩,罩内突出

的镜面安装在360°万向节上。该360°万向节反射镜是在当前布设在先进威胁红外对抗系统上的2轴转向装置基础上改进而成的。在圆罩内凝视,观察者可以看到另一个镜面网反射来自固定在下方激光器的光,并将光束指向固定在万向节上的主透镜。

果敢行为(Boldstroke)与通用红外对抗(CIRCM)要求对比如表1。

表1 Boldstroke与通用红外对抗(CIRCM)要求对比

| 通用红外对抗要求 | Boldstroke特点 |
|-------------------------------|--|
| 对抗概率 | 对抗当前不断增长的先进威胁 |
| 有效性 | > 98%;建立通用导弹告警系统和先进威胁红外对抗系统快速反应能力(QRC)实战经验 |
| 多威胁场景 | 同时对抗多种威胁 |
| 总体系统可靠性 | 两次故障之间平均时间 > 850 h |
| 模块化开放系统结构 | 设计采用非专用标准接口和商用货架元件 |
| 总安装系统质量 | < 115 lb(全部平台的A套件加B套件) |
| 训练 | 与嵌入机组人员训练完全兼容 |
| 到达目标的能量 | 比现有威胁多出3倍以上,适用于未来威胁。 |
| 光谱多样性 | 全部感兴趣的波段 |
| 通用红外对抗系统初始能力文件(ICD)的导弹告警系统兼容性 | 第2代、第3代通用导弹告警系统,联合威胁态势系统,其他。 |
| 激光耦合 | 直接光纤耦合 |
| BIT探测和隔离 | > 95%;包括激光器每个波段的功率等级监视,没有测试设备。 |
| 无需重新校准维护概念 | 2级,激光器和指示器/跟踪器分别在0级可互换。 |

Boldstroke目前已经投资8 300万美元,其零件比之前实战的红外定向对抗系统减少60%,可满足轻型和重型旋翼飞机平台对防护系统尺寸、质量和功耗的要求,使飞机的有效载荷最大化,提高武器系统的有效性,节省约10亿美元寿命周期成本。Boldstroke采用模块化开放式系统结构和非专用标准接口,支持可交换性和技术插入。它允许在激光器与指示器/跟踪器之间直接和光纤耦合,提供安装灵活性。

3.2 诺斯罗普·格鲁曼-赛莱克斯·伽利略团队研发的产品

诺斯罗普·格鲁曼公司的大型飞机红外对抗系统,是空军为军用运输机如C-17、C-5和C-130研发的,也是唯一持续生产并获得了投资的军用红外定向对抗项目。其改型AN/AAQ-24(V)25通过了海军陆战队CH-53E和CH-46E直升机验证,类似的直升机系统将装备英国皇家空军“灰背隼”飞机试飞并已

在荷兰AH-64D“阿帕奇”飞机上完成测试。

从技术的实用性考虑,BAE系统公司的AN/ALQ-212(V)先进威胁红外对抗项目和诺斯罗普·格鲁曼公司的大型飞机红外对抗系统是直升机和小型飞机的首选。

2009年9月诺斯罗普·格鲁曼公司宣布与意大利芬梅卡尼卡公司的赛莱克斯·伽利略分公司建立战略合作关系。按照合作计划,诺斯罗普·格鲁曼-赛莱克斯·伽利略团队将为经济、紧凑、轻型指向器-跟踪器系统(economic compact lightweight pointer-tracker system, ECLIPSE)整合处理和激光对抗功能,从而得到一种专用于中型和轻型直升机防御的第4代轻型高可靠红外定向对抗系统^[4]。

ECLIPSE的开发始于2007年。2008年在内华达州托诺帕导弹靶场上,一台集成了诺斯罗普·格鲁曼公司“蝰蛇”(Viper)红外对抗激光器、处理器和导弹告警器的ECLIPSE开发模型成功进行了一次实弹演

示实验。在实验中,ECLIPSE样机的微型指向器/跟踪器成功捕获、跟踪并摧毁了一枚飞行中的红外导弹。在第3代红外定向对抗(DIRCM)产品中,诺斯罗普·格鲁曼-赛莱克斯·伽利略联合团队生产了1 200套指向跟踪器和1 100套激光器,装备在了50个机型、450架飞机上。

作为通用红外对抗项目的竞标者,诺斯罗普·格鲁曼-赛莱克斯·伽利略团队宣布成功将连续激光自瞄准模块综合进先进干扰头。激光自瞄准模块确保激光能与干扰头跟踪点调成一线,使干扰能持续作用在威胁导弹上。干扰头的精确性和灵活性能使激光束保持在移动速度比声速还快的小型单兵便携导弹的整流罩上。自瞄准模块可与任何干扰激光器一起工作,未来升级激光器也无需改进干扰头。该系统可提供直升机对抗当前和未来威胁所需的干扰能量。

该团队成功演示了专用于保护军用旋翼平台的新型红外对抗系统。与当前的红外定向对抗系统相比,该新型红外对抗系统质量减轻了1/3,所需的电源输入功率仅为现在的1/4。系统采用开放式界面和嵌入式高分辨率红外摄像机,可快速升级。

3.3 ITT公司和洛克希德·马丁公司 Aculight 分公司团队研发的产品

ITT公司的综合射频对抗(SIRFC)系统的AN/AIQ-211系统控制着空军CV-22飞机的生存能力设备,包括AAQ-24红外定向对抗系统。

ITT公司的机载红外对抗(IRCM)系统是由该公司电子事业部开发的,与红外导弹告警集成安装在UH-60“黑鹰”直升机上。该系统能够对来袭导弹的红外制导系统实施干扰,从而保护己方飞机免受打击。2008年,ITT公司成功对系统进行了飞行测试。测试中采用了SciTec公司提供的红外导弹仿真器来模拟来袭导弹,以激活机载红外导弹告警系统。在试验中,直升机的距离在700~4 000 m之间,飞行速度为75节(138.9 km/h),同时试验要求直升机作出一些高达60°的横向机动翻滚动作;IRCM系统探测到来袭导弹,由一个指向跟踪器跟踪目标,然后由对抗激光器实施干扰功能。在完成了试飞工作后ITT公司便开始了该系统的低速率初始生产^[5-6]。

根据CIRCM系统的模块开放系统设计的要求,ITT公司把洛克希德·马丁公司的导弹告警接收机与ITT公司的指示器-跟踪仪和2个不同的激光器(一个来

自洛克希德·马丁公司,另一个来自日光公司)同时综合。2010年9月,在美国新泽西州Lakehurst地区“黑鹰”飞机上进行了系统试飞样机演示。系统利用光纤综合CIRCM系统的激光器和指示器-跟踪仪,减少了一些不必要的设备,从而减轻了质量并提高了可靠性。

3.4 雷声导弹系统公司研发的产品

雷声导弹系统公司利用AIM-9X“响尾蛇”导弹的成熟技术及强大的技术创新能力,开发了“蝎子”(Scorpion)和“平静眼”(Quiet Eyes)低成本红外定向对抗系统,计划装备轻型直升机、其他小型平台和快速飞行喷气机。

雷声导弹系统公司与美国海军联合设计、研制并验证的“蝎子”系统包括:小型激光指示器、控制器/处理器、先进的激光器和导弹告警系统。激光指示器是通过将AIM-9空-空导弹寻的器的万向支架改进而成,所提供的回转速度和指示精度可极大改进多威胁和近程交战防护。先进双色导弹告警系统,能显著增加有效距离并降低虚警率。固体多波段中红外激光器通过使用新型光机设计和制造方法并采用简化的光学结构降低了成本。控制器/处理器采用了在AIM-9X中进行过飞行验证的755(3)处理器技术。其尺寸小、功率大、生产量高。控制器/处理器对来自各个方向的单兵便携式空防系统的威胁具有超强的响应和精确的系统反应能力^[7]。

按照美国空军的国防采购合同,雷声导弹系统公司在AIM-9X空-空导弹寻的器改型的基础上又研制了一款名为“平静眼”的产品。计划装备美国空军的固定翼飞机。“平静眼”没有导弹告警传感器,它与“蝎子”上的红外定向对抗系统的结构基本相同,具有模块化设计的特点及较高的综合能力。

雷声导弹系统公司与诺斯罗普·格鲁曼公司一起把“平静眼”综合到大型飞机红外对抗系统上,成功验证“平静眼”转台控制该系统的高功率激光器及与系统处理器综合的能力。

2010年,雷声导弹系统公司完成了“平静眼”与安装在美国陆军UN-60直升机上的BAE公司先进威胁红外对抗系统综合后的飞行测试,在测试中先进威胁红外对抗系统的导弹告警识别靠近平台的红外威胁,“平静眼”转台快速回转到发现红外导弹威胁的方位,探测、跟踪威胁,并通过连接转台圆顶内望远镜的光纤发射激光摧毁导弹。

3.5 洛克希德·马丁公司与DRS公司和日光防务公司团队研发的产品

2011年5月23日,洛克希德·马丁公司联合其合作伙伴DRS技术公司和日光防务公司(daylight defense)向美国陆军提交了竞标方案,正式加入了CIR-CM项目技术演示阶段的竞标。

洛克希德·马丁公司将日光防务公司的量子级联激光器和DRS技术公司的指示跟踪器集成到了一个独特的分布式孔径系统中,这一方案可与陆军现役通用导弹告警系统(CMWS)配合使用,利用激光对抗措施为旋翼机提供保护免遭防空导弹威胁的攻击。该方案在质量、可靠性和可扩展性之间取得了平衡,可应对当前和未来的威胁,已经通过了美国政府主持的飞行试验。

4 竞标结果

在2011年5家公司(团队)技术研发阶段的竞标方案基础上,2012年美国陆军确定由2家红外定向对抗系统制造商——BAE系统公司、诺斯罗普·格鲁曼与赛莱克斯·伽利略团队为陆军、海军和海军陆战队的旋翼飞机研发轻型红外定向对抗系统,同时签署了2份为期21个月的技术研发合同^[8]。

2012年2月2日,美国陆军确定BAE系统公司作为两个最终参与者之一的生产商,为美国陆军、海军、海军陆战队直升机研发下一代(轻型的)通用红外对抗系统。为期21个月的技术验证项目总额为3800万美元。BAE系统公司的产品综合了前几代激光干扰系统的技术优势,采用经飞行验证的硬件和经BAE系统公司飞行模拟实验室测试过的算法,使其可对抗目前主要的威胁和未来威胁。采用模块化开放式系统方法(MOSA)和非专用接口,支持可互换性和技术插入,适用于未来10年升级^[9]。

2012年2月6日,美国陆军授予诺斯罗普·格鲁曼公司1份价值3140万美元的合同,发展通用红外对抗技术验证项目,根据合同,该公司及其工业合作伙伴、赛莱克斯·伽利略公司和日光公司将交付8套测试硬件,供陆军实施21个月的研究、发展、测试和评估,其中将包括可靠性测试、导弹干扰测试和装备陆军平台的飞行测试。诺斯罗普·格鲁曼公司的通用红外对抗系统是基于该公司激光红外对抗的第五

代产品,比现有的陆军激光红外对抗产品的质量轻50%以上^[10-11]。

5 技术发展亮点

在美国陆军通用红外对抗系统技术发展过程中,BAE系统公司、诺斯罗普·格鲁曼公司团队、ITT公司团队、雷声导弹系统公司等都推出了具有不同创新特色的技术产品,使通用红外对抗成为红外定向对抗技术发展的新亮点。

BAE系统公司的新技术是由先进威胁红外对抗技术发展而来的,其主要特点是:激光器和跟踪器/指示仪之间直接或激光耦合,提供安装机动性满足轻型和重型旋转翼平台对尺寸、质量和功率的要求;可主动跟踪和测距;具有模块化开放式系统结构与先进导弹告警系统兼容,包括通用导弹告警系统、联合威胁感知系统等。

诺斯罗普·格鲁曼公司采用商用现货技术设计了新型的轻量级处理器,该处理器比目前的红外定向对抗(DIRCM)处理器轻1/3。采用开放式界面和嵌入式高分辨率红外摄像机,可快速升级。系统能有效接收从导弹告警设备发来的指令,转动指示/跟踪器捕获快速移动目标,并持续干扰直至使先进的红外导弹失效。它的一个重要特点是,可以在强压及杂波环境下通过模糊直升机的螺旋桨干扰和拒绝耀斑干扰维持跟踪的方式来捕获快速移动的目标。

ITT公司提供的技术是模块化、开放式系统设计理念的范例。系统设计成接口完全开放,并为用户提供接口控制文件,使用户能够选择他认为最有效的分部件并可在不必再检定整个系统的条件下改造该系统。它能使系统充分利用军用和民用领域最好的零部件。采用这种方法既可以实现技术进步,又可以不断增加新的能力以应对未来的威胁和环境变化。

雷声导弹系统公司的AIM-9X空-空导弹红外导引头技术可在空战环境中探测快速移动目标并有效探测到肩射式导弹的攻击。采用量子级联激光技术的“平静眼”红外定向对抗微型转台可覆盖多个干扰波段。采用的模块开放系统技术即可把2条经验证的产品线综合到基于光纤的“蝎子”通用红外对抗系统中,也可将“平静眼”转台与各种激光器、通用导弹告警系统和其他紫外和双色导弹告警接收机综合。

(下转第65页)

shi, et al. Time-to-digital converter with vernier delay mismatch compensation for high resolution on-die clock jitter measurement. 2008 Symposium on VLSI Circuits Digest of Technical Papers, VLSIC, June 18, 2008 – June 20, 2008. Honolulu, HI, United states: Institute of Electrical and

Electronics Engineers Inc., 2008: 156–157.

- [13] 贾方秀, 丁振良, 袁峰, 等. 激光测距温度控制系统[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(6): 6.
- [14] 李密, 宋影松, 虞静, 等. 高精度激光脉冲测距技术[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(8):1469–1473.

(上接第11页)

6 结束语

美军各种作战直升机对红外定向对抗系统的需求由来已久,但受到成本、质量多种因素的限制,一直未能取得技术突破而大量装备。由于大型飞机红外对抗系统已经垄断了大型和固定翼飞机的红外定向对抗市场,通用红外对抗计划就成为机载电子战项目中下一块巨大的“蛋糕”。为了能在未来的市场竞争中占据主动,多家具有技术优势的公司(团队)通过自投资金及与陆、海、空军的合作开展了螺旋式技术升级和产品研发。技术与产品的竞争,推动着直升机载红外定向对抗装备向经济、轻型、先进有效的方向发展。前面提及的五家公司(团队)的竞标产品都通过了飞行测试并取得了较好的对抗效果。而BAE系统公司和诺斯罗普·格鲁曼公司团队的竞标成功,说明了其产品在技术创新及战场应用中的领先地位。

参考文献

- [1] Daniel Wasserbly. US Army Awards CIRCUM Development Phase Contracts [J]. Jane's Defense Weekly, 2012, 49(6): 11
- [2] Jen Judson. Acquisition Chief Directs Full Funding for CIR-

CM's Next Phase [J]. Inside the Pentagon, 2012, 28(2): 7

- [3] J. Knowles. US Army Issues CIRCUM REP [J]. The Journal of Electronic Defense, 2011, 34(3): 15
- [4] Skyler Frink. Northrop Grumman Chose for U.S. Army's Common Infrared Countermeasure Technical Demonstration Program [J]. Military & Aerospace Electronics, 2012, 23(4): 28
- [5] Jen Judson. GAO Denies ITT's Protest Over Army's Award of CIRCUM Contracts [J]. Inside the Pentagon, 2012, 28(21): 6
- [6] White Plains. ITT Adds Advanced Laser to CIRCUM [J]. Rotor & Wing, 2011, 45(11): 24
- [7] CIRCUM Not Just for Helos Anymore, Raytheon Says [J]. Unmanned Systems, 2011, 29(11): 12
- [8] Marina Malenic. US Army to Start CIRCUM Programme [J]. Jane's Defense Weekly, 2012, 49(3):11
- [9] Jen Judson. Northrop Grumman, BAE System Receive CIRCUM Development Contracts [J]. Inside the Pentagon, 2012, 28(5): 10
- [10] Daniel Wasserbly. US Army Takes Stock of Common Infrared Countermeasures Bids [J]. Jane's Defense Weekly, 2011, 48(20): 9
- [11] Tong Skinner. CIRCUM Program moves ahead [J]. Defense Helicopter, 2010, 29(1): 5
- [12] US Army Poised to Launch Infrared Protection Battle [J]. Flight International, 2010, 178(10): 16

(上接第15页)

- [6] 杨洋, 赵远. 1.06 μm 激光的大气传输特性[J]. 红外与激光工程, 1999, 28(1): 15–19.
- [7] 程玉宝, 孙晓泉, 赵明辉, 等. 激光信号大气散射探测分析[J]. 激光技术, 2006, 30(3): 277–279.
- [8] 巨养锋, 梁冬明, 薛建国等. 威胁源参数对激光散射截获半径的影响[J]. 激光与红外, 2011, 41(4): 426–429.

- [9] 张建奇, 方小平. 红外物理[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2004: 141–185.
- [10] ACCETTA J S, SHUMKER D L. The infrared and electro-optical systems handbook [M]. 7th ed, Bellingham: SPIE Optical Engineering Press, 1993: 70–90.