

红外焦平面成像器件的重大应用

陈伯良

(中国科学院 上海技术物理所, 上海 200083)

摘要: 红外探测器技术在 20 世纪 90 年代取得了飞速发展。对红外焦平面列阵器件在各种重大国家安全项目例如弹道导弹防御计划、重要新型武器系统及高级空间计划中的应用作一简要介绍。

关键词: IRFPA; 弹道导弹; 红外热像仪

中图分类号: TN21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2005)02-0168-05

Important applications of IRFPA imaging devices

CHEN Bo-liang

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: Great progress in infrared detector technology has been achieved in the nineties of the 20th century. A brief review on the applications of infrared focal plane arrays to a variety of nation security programs of the United States such as ballistic missile defense program, new-generation weapon systems and advanced space programs is provided.

Key words: IRFPA; Ballistic missile; Infrared thermal imagery

0 引言

红外探测器技术在 20 世纪 90 年代取得了飞速发展。红外焦平面列阵成像技术进入了成熟期。高性能大规格焦平面列阵已应用于各种重大国家安全项目中,例如弹道导弹防御计划和重要新型武器系统。

本文简要评述了红外焦平面列阵器件在世界先进军事技术中的重要应用。

1 在弹道导弹防御中的应用

美国的弹道导弹防御(BMD)计划是当前国际上广泛关注的一个热点问题。BMD 计划针对敌方导弹

在发射助推段、大气层外弹道飞行段和再入大气层段这三个阶段的不同特点,采取不同的方法,建立多层次的、全程的拦截体系。在这种拦截体系中,红外焦平面列阵成像技术扮演着一种核心的角色,主要表现在以下三个方面:

(1) 全球性监视。在敌方导弹发射的初始阶段,就探测到其位置和数量;

(2) 跟踪和鉴别。在敌方导弹发射的初始阶段和弹道飞行阶段,鉴别真、假目标并跟踪其轨迹;

(3) 识别和制导。在己方发射的拦截导弹上,以红外成像方式实现目标识别和精确的制导,命中摧毁敌弹。

收稿日期:2004-02-04; 修订日期:2004-04-06

作者简介:陈伯良(1943-),男,上海市人,研究员,主要从事红外探测器材料和器件研究,碲镉汞、铽化铟红外焦平面器件等重大项目的研究,在国内外发表论文 30 余篇,获专利 5 项。

1.1 全球监视和跟踪

全球监视和跟踪主要依靠部署在空间的预警卫星进行。早期使用 PbS 线列探测器,以后改用 MCT 光导、光伏和 InGaAs 光伏线列。目前在轨工作的 DSP 卫星为第三代,使用了 6000 元 InSb 线列。目前,美国正在研制结构更加庞大、性能更加先进的天基红外预警系统(SBIRS)。SBIRS 系统由 6 颗高轨道卫星(4 颗同步轨道和 2 颗大椭圆轨道)和 12~24 颗低轨道卫星组成,承担导弹预警、为导弹防御系统指引目标、提供技术情报和战局分析四项任务。天基红外预警系统采用了可见光探测器和短波、中波、长波到甚长波的各种型式的红外焦平面,包括 6000×1、768×8 和 432×432 元 MCT 探测器。

1.2 拦截导弹的精确制导

国家导弹防御(NMD)的拦截系统称为陆基拦截器/外大气层杀伤飞行器(GBI/EKV),由多波段红外寻的头实现末级识别和制导。NMD 系统的首次飞行拦截试验所用 EKV 长 1.40 m,重 55 kg,带 2 个红外和一个可见光探测器及一台小型推进器,以及制导和控制、通信、计算机及识别软件等系统,由雷声公司研制,如图 1 所示。第一次拦截取得了成功,2000 年第二次拦截试验遭到了失败。原因在于红外探测器用制冷器的一根细管子破裂,冷却液泄漏,红外探测器未能工作,寻的头未找到目标。红外焦平面成像导引在 NMD 系统中的关键作用可见一斑。

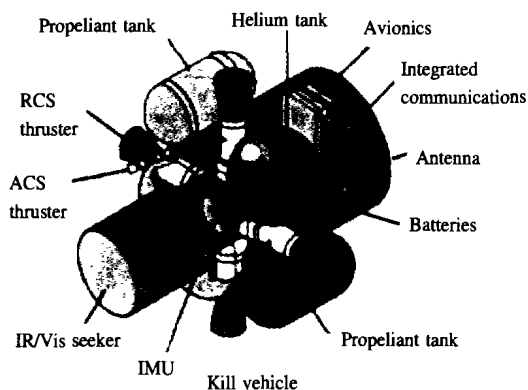


图 1 外大气层杀伤飞行器构造示意图

Fig.1 Schematic diagram of exo-atmospheric kill vehicle (EKV)

2001 年 12 月 4 日在 NMD 第四次拦截试验中,雷声公司的外大气层杀伤飞行器使用了 256×256 元短

波/中波/长波三波段红外焦平面,成功拦截了敌弹。这三个波段是:1.9~2.5 μm 、3.4~4.0 μm 、7.5~9.5 μm 。图 2 是 EKV 发回的捕获敌弹的可见/红外四波段图像^[1]。此时离撞击敌弹还有 1.92 s,距离大约为 10 km。2002 年 10 月 14 日,GBI 在太平洋上空 225 km 高度再次摧毁带假目标的入侵靶弹,这是 GBI 连续第四次成功拦截。是年 12 月 17 日,美国总统布什下令部署初步导弹防御系统——2004 年 10 枚,2005 年 10 枚。这样,以红外焦平面器件为核心技术的美国导弹防御系统就从计划变成了现实。

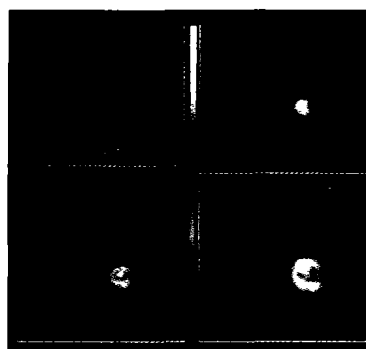


图 2 EKV 捕获敌弹的可见/红外四波段图像

Fig.2 Visible/infrared 4-band views of incoming target missile by MDA EKV

EKV 对红外焦平面器件的要求不断提高甚至几近苛刻。美国 MDA 官员指出^[2],在外大气层拦截器应用中,打击对象是低辐射背景中的较“冷”的目标,具有较小的尺寸,经常使用假目标和对抗措施,要求拦截器的寻的头具有更大的捕获截面,具有多目标跟踪、自主或半自主辨别、最佳末制导和瞄准点选择的能力。BMD 需要从短波红外到甚长波红外(VLWIR)波段的高灵敏、高均匀、大规格、具有双色或多色能力的抗辐射的焦平面器件。在长波(8~12 μm)和甚长波(12~18 μm)范围,近期关注的是碲镉汞和量子阱探测器。

MCT 探测器有很高的量子效率(70%),在中、高背景下 77 K 工作的长波 MCT 达到了背景限。对大气层内低温目标寻的器而言,MCT 是极好的候选者。

GaAs/AlGaAs 量子阱的光电转换效率相对较低,77 K 热产生率相对较高,因此在 77 K 温度以上工作时,其性能不能和 MCT 匹敌。但是,由于 GaAs 工艺十分成熟,均匀性非常好,而且,当工作温度从 77 K

降到 40 K 时,热辅助隧道电流受到抑制,暗电流降低 3~4 个数量级。此外,在甚长波段的各种双色结构也较易实现。目前,多家公司报道制成了长波 640×480 元量子阱焦平面,已经演示了甚长波 ($15 \mu\text{m}$) 128×128 元器件,并在研制长波/甚长波双色结构。加之量子阱焦平面抗辐射性能比 MCT 强,因此在大气层外低温低背景战略应用中有非常好的性能。可以推测,量子阱焦平面正被考虑作为外大气层拦截器的重要候选者。

为了拦截敌方射程在 600~3500 km 的中程弹道导弹,美国重点研制和部署陆基的战区高空区域防御系统 (THAAD) 和海基的海军全战区导弹防御系统 (NTW)。

(1) THAAD 地空导弹由美国 Lockheed-Martin 公司主承包。这种导弹既可用于在大气层内高空 (~40 km) 拦截敌弹,又可用于大气层外高空 (最高 150 km) 拦截目标。最大拦截距离 200 km,可保卫地域半径 100 km。THAAD 导弹长 6.17 m,弹径 0.37 m,质量 800 kg,最大飞行速度 8 Ma。弹头的动能杀伤拦截器 (KKV) 上装有用于捕获和跟踪目标的中波红外导引头。该导引头使用 512×512 元 InSb 凝视焦平面器件。1999 年 6 月 10 日和 8 月 2 日连续 2 次实弹拦截试验成功,命中精度为 0.30 m。THAAD 计划已正式进入工程制造演示阶段 (EMD)^[3]。美国计划到 2008 年生产和部署 1422 枚 THAAD 导弹,总费用 134 亿美元。

(2) NTW 系统中的拦截导弹是海军标准 III 导弹。该导弹的射高为 70~500 km,射程 1200 km,其战斗部是一种称作轻型外大气层射弹 (LEAP) 的飞行器。LEAP 由休斯公司提供红外寻的头,采用 256×256 元长波 MCT 焦平面列阵,设计探测距离 300 km。2002 年 1 月 25 日,在 Aegis 巡洋舰上进行了实弹拦截取得成功,图 3 是 LEAP 红外焦平面组件捕获的来袭敌弹的热像。

对于突破了高空防御而进入大气层的敌方来袭弹道导弹而言,美国有两种使用红外焦平面的低空导防系统。

(1) 海军区域防御系统。该系统以“宙斯盾”级战舰为平台,其拦截手段为海军“标准 II-4A”导弹,其红外导引头采用了 256×256 元 InSb 凝视焦平面列阵^[4]。

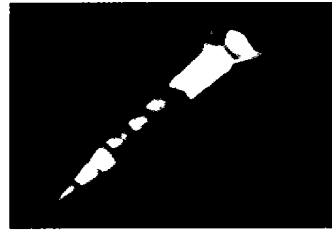


图 3 NTW 红外焦平面组件捕获的来袭敌弹热像

Fig.3 Thermal image of interceptor missile obtained by NTW

(2) 美国和以色列联合研制的“箭-2”(Arrow-2) 导弹防御系统。该导引头工作在 $3.3 \sim 3.8 \mu\text{m}$ 中红外波段,采用 256×256 元 InSb^[4]。“箭-2”导弹长 6.3 m,弹径 0.8 m,飞行速度 9 Ma,拦截距离 110 km,拦截高度为 40 km。1999 年 11 月 1 日,“箭-2”全系统拦截试验成功,以色列接着就开始部署,计划总数 1200 枚,耗资 22.5 亿美元。2000 年 3 月 15 日,“箭-2”导弹防御系统正式投入使用,使以色列成为全世界第一个具有反导实战能力的国家。

在助推段拦截计划中,双波段红外焦平面器件在观测导弹助推段的红外特征方面获得了十分珍贵的信息。例如,DeltaIIA 火箭发射后 60 s,当第二组助推器点火时,尾焰的中波红外辐射特征消失,而长波红外特征十分明显。而 AtlasIIA 液体燃料火箭则不同,发射时各阶段中波和长波红外特征没有重大差异^[5]。

从以上介绍可见,BMD 从监视、威胁探测、跟踪、识别,到瞄准、拦截的全过程,都需要红外传感器。弹道导弹防御计划对红外焦平面阵列器件依赖如此大,不妨可以说,在某种程度上,BMD 计划的成败,命悬一线于一个小小的焦平面器件。

2 在常规导弹武器中的应用

采用红外成像制导可使导弹获得更远的全向探测距离和识别、对抗红外诱饵等人工干扰的能力,大大提高导弹的威力,而且也使其成为对付隐形飞机等的“杀手锏”。常规导弹制导对焦平面的要求是:以凝视型为主,以中、小规模为主,批量大。这里仅介绍最典型的几种。

2.1 第四代空对空导弹

主要有法国 MICA 导弹(红外型)、英国 ASRAA

M 导弹、德国 IRIS-T 导弹、美国 AIM-9X 导弹。

美国 AIM-9X 近距空空导弹是美国重点发展的最新型空空导弹,由空军-海军联合开发。由于需求数量庞大,此项计划的竞争被描述为每 30 年一次胜者为王的竞争。休斯导弹系统公司和雷声公司各提出了两种投标方案。休斯公司的寻的器采用改进的 128×128 元 InSb 焦平面列阵,头罩向后扩展,允许传感器向后探测的范围更大,可在 0.1 s 内转动达 90° 。而雷声公司在寻的器设计中采用 256×256 元焦平面列阵。两公司都采用了双色寻的器以较好地鉴别干扰,且都应用 InSb 焦平面。最后休斯公司中标。接着开始了历时 3 年的验证试飞。1999 年进行了发射试验。AIM-9X 导弹长 3.02 m,弹径 0.127 m,质量 85.5 kg,在目标探测距离和间接瞄准能力方面有大幅度的提高。AIM-9X 使用斯特林制冷器,导引头可以长时间连续工作。其导引头具有精确的目标成像能力,可使跟踪器能够选择目标上特定点瞄准,而不仅是在弹体和尾焰处,具有很高的抗干扰和杂波抑制性能。首批生产的 1000 枚 AIM-9X 导弹于 2001 年交付美国海军和空军使用,装备在顶级的 F-22 战斗机和其他先进飞机上。海军、空军共订购了 10000 多枚。

2.2 先进反装甲导弹系统

在红外焦平面技术发展初期,最先成功应用的领域是反装甲导弹系统的热瞄准器和精确制导寻的器。美国和欧洲的一些主要先进反装甲导弹计划,现已处于装备、服役阶段。

(1) 美国“标枪”(Javelin)导弹系统,由美国雷声公司和洛克希德-马丁公司联合研制和生产。导弹长 1.1 m,弹径 0.125 m,发射质量 22.3 kg,射程 2.5 km。导引头采用 64×64 元长波 MCT 焦平面,热瞄准器采用了 240×2 长波 MCT。20 世纪 90 年代后期,Javelin 导弹已经大量生产并装备美国陆军和海军陆战队。据称,需求量为 58000 套。此次伊拉克战争中,美国海军陆战队大量使用了此种导弹。

(2) 欧洲第三代远程反坦克导弹(TriGAT-L,又名 ATGW-3)。1988 年由法、德、英三国联合研制,现由欧洲导弹公司生产。该导弹分远程和中程两种。远程 TriGAT 弹长 1.57 m,弹径 0.15 m,发射质量 49 kg,射程 8 km,由法、德两国“虎”直升机或车载发射。

TriGAT-L 导弹系统的机载和车载热瞄准器采用著名的 288×4 元长波 MCT 焦平面,导引头采用 32×1 长波 MCT 线列焦平面。

(3) 美国“狱火”导弹(Hellfire)。为机载和陆基反装甲武器,美军编号为 AGM-114。弹长 1.62 m,弹径 0.18 m,弹重 43 kg,加装红外成像导引头后,最大射程为 9.2 km。相继采用 64×64 、 128×128 元 PtSi 焦平面。1995 年投入使用,被认为最适合配备攻击直升飞机。

3 在军用红外热成像仪中的应用

红外热成像仪是应用最广泛的红外装置。20 世纪 70 年代,第一代红外热成像仪大都采用 MCT 的 60、120 和 180 元线列“通用组件”制造的前视红外系统,即 FLIR,它占红外军事应用的 50% 以上。对 FLIR 的大量需求造成了美国 MCT 市场在七八十年代的繁荣。到 1990 年美国共生产 80000 余套通用组件。军方需要性能更高的第二代热成像仪,SADA 应运而生。

SADA 即美国陆军标准先进杜瓦组件。SADA I 为 240×2 长波 MCT TDI 扫描焦平面,SADA II 为 480×6 (以及 480×4) 长波 MCT TDI 扫描焦平面,使用 SADA II 的第二代热成像仪比使用 180 元通用组件的第一代热成像仪的探测距离提高了一倍。

SADA II 已广泛用于各种机载、舰载和车载的热像仪和搜索跟踪系统中,如 Bradley 战车、Abrams M1 坦克、Comanche 装甲。一项称作“水平技术插入”的计划就是用第二代的 SADA II 替代所有军事装备上使用的第一代通用组件的热像仪,以大幅度提高性能。

在法国,基于 288×4 的长波 MCT TDI 组件的热成像仪也有很大发展,如 LWIR Sofie 计划。Sofie 热成像仪广泛用于战车、直升机和军舰上。

凝视型焦平面热像仪具有更多的优点:小巧、坚固可靠、省电,灵敏度更高。 640×480 元 InSb 凝视焦平面热成像仪探测距离是通用组件的 4 倍,现已被美军选定在超级战机如 F-22、V-22 和 F-18 上使用。

4 在空间的应用

目前红外焦平面器件的空间应用主要有三方面:

环球表面监测、行星和空间探索以及军事事件的监视。

自从 1960 年第一颗气象卫星上天以来,籍助红外探测器的功用,全球表面的大气温度和湿度分布、云层分布和性质、悬浮颗粒物、海面温度和海洋水色、冰面覆盖度、臭氧和其他痕量气体浓度分布、台风发生和发展、作物生长和农业资源等大量信息得以获取和利用。20 世纪 90 年代初,美国制定了使用红外焦平面器件的新的系列地球观测卫星计划(EOS)。执行地球观测使命的主要仪器是中分辨率成像光谱仪(MODIS)。MODIS 装载在 Terra 卫星和 Aqua 卫星上,每 1~2 天把全球表面观测一遍并发回图像数据。装载在 Terra 星上的首颗 MODIS 飞行模样已于 1999 年 12 月 18 日升空,迄今已发回几千幅陆地、海洋和内大气层的全球图像。

MODIS 用推扫扫描方式记录全球表面从可见到长波红外 36 个波段的图像信息,使用了 4 个独立的焦平面模块^[6]。0.4~1.0 μm 波段由 2 个 Si-PIN 焦平面探测,SWIR/MWIR(1.2~4.5 μm)和小于 10 μm 的长波红外由一个 MCT 光伏焦平面模块探测,而 10~14 μm 的 6 个波段由 MCT 光导器件承担。Si 器件为 40 元线列,MCT 器件为 10 元和 20 元线列。光伏器件由 CMOS 读出,使用的输入结构为 CTIA。当观测地表和云层温度的第 31、32 波段(10.78~12.27 μm)时,要求器件的 NEDT 为 50 mK。MODIS 设计寿命 6 年,将承担 21 世纪头 10 年的地球观测任务。图 4 是 MODIS 长波焦平面模块的实样图片。图 5 是 MODIS 获取的 2001 年 5 月全球海面温度分布。

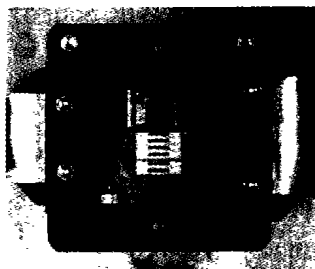


图 4 MODIS 长波红外焦平面模块

Fig.4 Long wavelength infrared FPA module of MODIS

测卫星系列,美国规划了国家极轨环境卫星系统 NPOESS。NPOESS 需要甚短波、短波、中波、中长波、

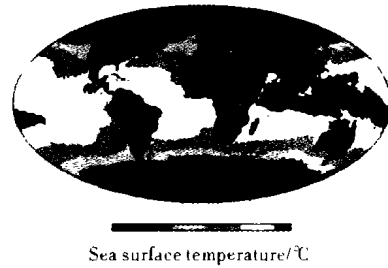


图 5 MODIS 获取的全球海面温度分布

Fig.5 Global sea surface temperature profile obtained by MODIS

长波和甚长波 6 大波段的焦平面器件。Boeing/Rockwell 正在为其研截止波长分别为 1.86、3.3、4.68、6.56、10.2 和 14 μm 的 MCT 焦平面器件。

在星际和深空探索方面,红外焦平面也已经充当起重要的角色。美国哈勃太空望远镜上装载了近红外多目标照相光谱仪,其探测器是 Rockwell 公司研制的 256×256 元短波 MCT 焦平面,波长范围 0.8~2.5 μm,用氮冰制冷^[7]。日本在 2002 年发射红外成像勘测仪,采用 512×512 元 InSb 焦平面和 256×256 元 Si:As 焦平面。在陆基天文望远镜中,有使用 1024×1024 元 InSb 焦平面的“神灯”,使用 1024×1024 元 MCT 焦平面的“夏威夷-I”和使用 2048×2048 元 MCT 焦平面的“夏威夷-II”等。南欧洲天文台的 VLT 望远镜已经装配了 Rockwell 公司研制的由 4 个 Hawaii-2RG 拼接成的 4096×4096 元 MCT 焦平面。

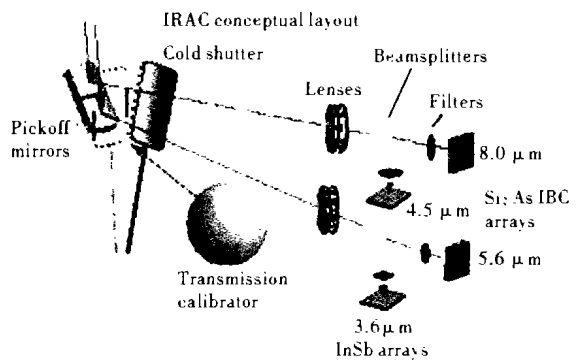


图 6 SIRTIF 红外阵列照相机光路

Fig.6 Conceptual layout of the infrared array camera (IRAC) of Spitzer

作为下一代功能更强、价格更低、体积更小的地球观

(下转第 182 页)

参考文献:

[1] 徐产兴.雷达目标识别技术及其新发展[J].雷达与对抗,1994, 2:1-9.

[2] 韩玉阁,宣益民.目标与背景的红外辐射特征研究及应用[J].红外技术,2002,24(4):16-19.

[3] 韩玉阁,宣益民.大气传输特性对目标与背景红外辐射特性的影响[J].应用光学,2002,23(6):8-11.

[4] 王毅,饶瑞中.空间斜程能见度的影响因素分析[J].强激光与粒子束,2003,15(10):945-950.

[5] Jörgen Karlholm, Ingmar Renhorn. Wavelength band selection method for multispectral target detection[J]. App Opt,2002,41(32):6786-6795.

[6] 吴北婴,李卫,陈洪滨,等.大气辐射传输实用算法[M].北京:气

象出版社,1998.

[7] 王永生.大气物理学[M].北京:气象出版社,1987.

[8] 宋正方.应用大气光学基础[M].北京:气象出版社,1990.

[9] 张逸新,迟泽英,陈文建.烟幕对红外目标对比度衰减的变化规律的研究[A].目标与环境特征“九五”技术成果论文集(下册)[C].北京:目标特性及其传输专业组,2001.260-267.

[10] 周秀骥,陶善昌,姚克亚,等.高等大气物理学[M].北京:气象出版社,1993.

[11] Liou K N. An introduction to atmospheric radiation[M].New York:Academic Press,1980.

[12] 方勇华,荀毓龙,韦占凯,等.一种采用 ZnSe 分束器的新型傅里叶变换光谱仪[J].量子电子学报,1997,14(1):81-85.

[13] 王毅,范伟,饶瑞中.大气、地表条件对目标-背景对比度的影响分析[J].量子电子学报,2004,21(1):92-97.

(上接第 172 页)



图 7 螺旋状星系 M81 的可见(右上角)和红外图像

Fig.7 Multiple infrared views of spiral galaxy Messier 81

2003 年 8 月 25 日,美国又将研制了 20 年、迄今最为先进的空间红外望远镜发射到了太阳系地球随轨道上。图 6 是 Spitzer 望远镜上四波段红外照相机的光路,四个波段中心波长分别为 3.6、4.5、5.6 和 8.0 μm ,采用了 2 个 256 \times 256 元 InSb 和 2 个 256 \times 256 元 Si:As 焦平面组件^[8]。Spitzer 望远镜发回了大量图像。图 7 是距地球 1200 万光年的螺旋状星系 M81 的可见(右上角)和红外图像。左下、中下和右下分别为 24、8.0 和 3.6 μm 红外像,中央为 3.6~24 μm 多波段复合像。2003 年情人节前夕,Spitzer 望远镜又及时送来了仙王座 NGC-7192 新星团状如玫瑰花蕾的美丽图像,如图 8 所示。

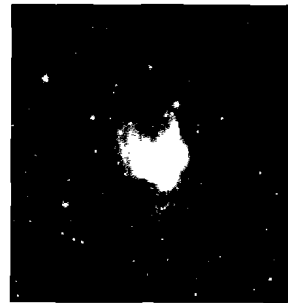


图 8 仙王座 NGC-7192 新星团的图像

Fig.8 Commemorative picture taken from nebula NGC-7192 in the constellation Cepheus

参考文献:

[1] MDA.Making missile defense reality[EB/OL].http://www.acq.osd.mil/bmdo.2003

[2] Walter R Dyer,Meimei Z Tidrow.Applications of MCT and QWIP to ballistic missile defense [A].SPIE[C].1998,3379.434-440.

[3] Maxtech International, Inc.Infrared imaging news[EB/OL].http://www.maxtech-intl.com/irnews.htm.2004

[4] Dornheim M A,Fulghum D A.Four distinct AIM-9X designs proposed[J].Aviation Week and Space Technology,1996,145(23): 22-24.

[5] Goldberg A C,Theodore Fischer,Derzko Z I.Application of dual-band infrared focal plane arrays to tactical and strategic military problems[A].Proceedings of SPIE[C].2003,4820.500-514.

[6] Barbara Conboy[EB/OL].http://modarch.gsfc.nasa.gov/MODIS.2003.

[7] Space Telescope Science Institute.NICMOS[EB/OL].http://www.stsci.edu/instruments/nicmos.2004.

[8] Spitzer Science Center[EB/OL].Spitzer Space Telescope. http://sirtf.caltech.edu.2004.