

CE-II型EKV红外传感器性能分析

康甜

(中国工程物理研究院总体工程研究所, 四川 绵阳 621999)

摘要: 简要介绍了红外传感器主要参数对其性能的影响规律, 调研了 EKV 红外传感器的发展历程, 对 CE-II 型 EKV 红外传感器的性能参数进行了估计, 其在像元阵列、视场角和帧频方面应当有明显提升。分别利用探测率和噪声等效辐照度对探测距离进行了计算, 结果表明 CE-II 型 EKV 红外传感器的实际探测距离应当在 500 km 水平。

关键词: EKV; FPA; 红外传感器; 探测距离

中图分类号: TN215

文献标识码: A

文章编号: 1001-8891(2017)06-0495-05

Performance Analysis of CE-II EKV Infrared Sensor

KANG Tian

(Institute of Systems Engineering at China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, China)

Abstract: A brief introduction of infrared sensor main characteristics and their effects were presented. Development and history of EKV infrared sensor was investigated. Estimations of CE-II EKV infrared sensor performance show its format scale, field of view angle, and frame rate were improved. Detection range was calculated respectively with detectivity and noise equivalent irradiance, and results show that the actual detection range of CE-II EKV infrared sensor is around 500 km.

Key words: EKV, FPA, infrared sensor, detection range

0 引言

大气层外杀伤器 (EKV, Extro-atmosphere Kill Vehicle) 是美国地基中段防御 (GMD, Ground-based Midcourse Defense) 系统中地基拦截弹 (GBI, Ground Base Interceptor) 的有效载荷, 承担中段末端拦截的目标搜索、识别、跟踪和碰撞杀伤的任务。2014 年 6 月, 美国成功开展了代号为 FTG-06B 的地基中段防御系统拦截试验。此次拦截试验是 CE-II 型 EKV 首次成功拦截目标。试验中, EKV 成功从诱饵中识别出“弹头”。红外传感器是 EKV 实现目标识别和跟踪的关键器件。本文回顾了 EKV 红外传感器的发展历程, 并对 CE-II 型 EKV 的红外传感器关键性能参数进行了分析。

1 红外传感器性能参数

EKV 用红外传感器为凝视型红外焦平面阵列 (Focal Plane Array, FPA), 主要性能参数及其对探测性能的影响简要介绍如下:

收稿日期: 2016-05-28; 修订日期: 2016-08-24。

作者简介: 康甜 (1987-), 女, 工程硕士, 工程师。主要研究方向: 突防技术。E-mail: 411kangt@caep.cn。

基金项目: 总装预研; 863 计划 (2013AA8021029)。

1) 像元尺寸: 像元尺寸决定了探测的瞬时视场角; 像元尺寸越小, 相同尺寸传感器的阵列规模越大, 空间分辨率越高; 像元尺寸越大, 可以提高光敏面积占比, 即填充系数, 则灵敏度越高。

2) 像元阵列: 像元阵列越大, 视场角越大。

3) 截止波长: 截止波长决定了衍射极限光斑直径, 像元尺寸应大于衍射极限光斑直径 (否则会引起光学串音^[1])。截止波长取决于目标的辐射波长范围。

4) 量子效率: 探测器接收辐射后所产生的载流子数与入射光子数之比称为量子效率。量子效率与材料组分和工作温度有关^[2]。量子效率越高, 对读出电路的输出电流越大。

5) 工作温度: 工作温度越低, 量子效率越高, 噪声等效辐照度越低。

6) 暗电流/漏电流: 暗电流与结面积的平方成正比。光敏面积越小, 暗电流越小, 对读出电路的输出电流越大。

7) 零偏电阻面积积: 无偏压电阻值与二极管面积的乘积^[3]。决定了传感器的电流-电压特性, 零偏电

阻面积积越大，探测率越高。

8) 峰值探测率：正比于探测器面积和带宽的平方根，探测距离的平方正比于峰值探测率^[3]。

9) 噪声等效辐照度、噪声等效温度、噪声等效功率：均用于表征传感器自身的噪声水平，3个量之间为线性正相关，量值越低，传感器性能越好。

10) 动态范围：传感器输出的最大值和最小值的比值，是信噪比的另一种描述形式。动态范围越大，传感器的测量精度越高。

11) 响应一致性：响应一致性越高，阵列中各像元对于相同输入条件下的响应则越接近，传感器性能越好。像元响应的非均匀性需要通过补偿算法来进行修正，也可以通过减小模数转换的位数，但这样又会减小系统的动态范围^[4]。

12) 可用像元：传感器阵列中由于生产工艺缺陷等，存在个别像元无法正常工作的情况。可用像元比例越高，传感器性能越好。

13) 积分时间：积分时间越长，光通量越大，即信噪比越大，测量的准确度就越高。积分时间受到读出电路帧频率的限制，一般小于帧间隔时间。同时积分时间决定了系统带宽。

14) 瞬时视场角：单个像元对应的视场角。瞬时视场角越大，横向距离分辨率越大，对同一物体可分辨的距离就越远。

15) 等效焦距：焦距越大，相同分辨率要求，像元尺寸可以较大。

16) 通光孔径：通光孔径越大，通光面积越大，探测目标的光通量越大。

17) 光圈：焦距与通光孔径的比值，光圈数越小，通光量越大。

2 EKV 红外传感器发展历程

自1998年以来，Raytheon公司是EKV的唯一研制单位，其下属部门Raytheon Vision System（RVS）负责EKV红外传感器的研制。

1998年，EKV红外探测系统是由一个单色长波红外焦平面阵列和一个单色甚长波红外FPA组成的双波段探测系统，安装在陶瓷或者铍的组件上^[5]。像元阵列 256×256 ，像元尺寸 $30\text{ }\mu\text{m}$ ，结构形式为液相外延生长的双层异质结，基体材料为CdZnTe，钝化层为CdTe。飞行中用液氮快速冷却至70K。一个FPA的截止频率位于长波波段的较低部分，另一个位于长波波段较高的部分。读出电路型号为S-117。当时的Raytheon Infrared Center of Excellence对两个波段的FPA分别进行了测试，测试的工作温度71K，光圈

$F/2.5$ 。测试要求量子效率在 $8.6\text{ }\mu\text{m}$ 时大于60%，实际测试得到的量子效率大于70%。表1是两个FPA的主要测试结果。两个FPA的平均噪声等效辐照度均在 $10^{11}\text{ photon}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 量级。

表1 1998年EKV红外FPA测试结果

Table 1 EKV infrared FPA test results in 1998

参数	长波红外FPA	甚长波红外FPA
像元大小	$30\text{ }\mu\text{m} \times 30\text{ }\mu\text{m}$	$30\text{ }\mu\text{m} \times 30\text{ }\mu\text{m}$
像元阵列	256×256	256×256
蓄电量	56 Me^-	56 Me^-
漏电流	15 pA	150 pA
瞬时动态范围	2000	1000
总动态范围	10 000	5 000
响应一致性	1.22:1	1.22:1
积分时间	$8\text{ ms}@30\text{ Hz}$	$8\text{ ms}@30\text{ Hz}$
主时钟频率	2.0 MHz	2.0 MHz
功耗	130 mW	130 mW

此后，RVS主要针对双色红外FPA开展了大量研发工作。采用更大规模双色长波红外FPA具有诸多优势：FPA的规模越大，可以增大视场角，和捕获目标的距离。利用两个不同波段的光谱信息可以辨识绝对温度以及目标的特征。结合先进的信号处理，双色红外探测与单色相比，可以提高敏感性。双色长波红外FPA可有助于提高弹道导弹弹头的捕获、识别和跟踪的能力^[6]。

2004年，RVS的 $256 \times 256, 30\text{ }\mu\text{m}$ 双色红外FPA就取得了显著的成果。RVS能够提供任意两个不相重叠波段的双色红外FPA，波长范围从短波一直到甚长波^[6]。

2005年起，MDA（Missile Defense Agency）提出了“大气层外探测器性能增强”项目，旨在发展低成本的、性能增强的、用于EKV和其他BMD（Ballistic Missile Defense）系统，如KEI（Kinetic Energy Interceptor），MKV（Multiple Kill Vehicle），SM-3（Standard Missile-3）等的红外探测器。目标要求是增加探测距离、增大探测视场、提高对目标的分辨率、优化导航方式和瞄准点的选择。该项目要求采用新技术的探测器必须能够满足目前探测器的体积和重量要求，并且能够在2010年至2012年间实现替换。需要增强的主要器件就包括了大规模多色FPA。上世纪末研制的EKV探测器有两个长波红外FPA，需要进行分光^[5]，信号重构和传感器的校准降低了系统的可靠性。通过该项目希望能够实现：单片 512×512 的可同时读出的多色长波红外FPA，像元一致性、可用

性高,像元尺寸小(约 $25\mu\text{m}$),读出电路噪声低,使EKV的捕获、跟踪和识别能力增强;同时减小成本、重量和体积。该项目要求的探测波长范围为 $8\sim12\mu\text{m}$ 。

2006年,RVS成功研制了一款 $20\mu\text{m}$ 的中波/长波双色红外FPA^[7]。图1是该传感器 78K 工作温度下的光谱响应曲线,相对响应为0.5的截止波长,中波为 $5.5\mu\text{m}$,长波为 $10.5\mu\text{m}$ 。

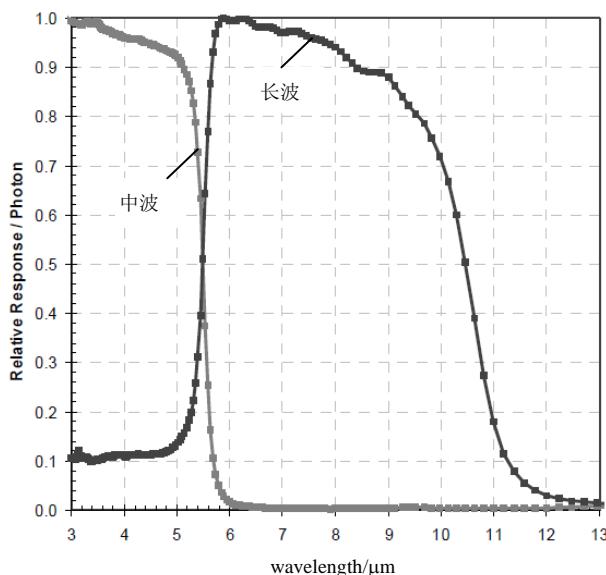


图1 RVS 中波/长波红外 FPA 频谱响应曲线

Fig.1 MWIR/LWIR FPA spectral response curves at RVS

2010年,RVS已经可以生产像元阵列 512×512 、像元尺寸 $30\mu\text{m}$ 的双色长波红外FPA^[8],采用分子束外延3层异质结结构,衬底材料为CdZnTe。两个波段的截止频率大约为 $8\mu\text{m}$ 和 $11\mu\text{m}$,工作温度 70K ,像元的响应曲线如图2所示。测试用的读出电路型号为SB-410,帧频为 100Hz 。SB-410采用了一种边积分边读出的工作模式,可以使得积分时间达到帧间隔的99%以上,能够在低背景噪声情况下提供最大的灵敏度。工作温度 72K 时,较低波段有效像元99.0%,较长波段是96.5%。2011年时,当工作温度为 68K ,较长波段的有效像元提高到了99.02%,较低波段为99.33%^[9]。

3 CE-II型EKV红外探测能力分析

3.1 CE-II型EKV红外传感器主要性能参数

以Raytheon目前的技术能力,CE-II型EKV红外传感器应当较CE-I型有明显的性能提升。由于尚无官方报道,分析时取RVS能够达到的最高水平,根据调研结果估计的CE-II型EKV红外传感器的主要性能参数见表2。

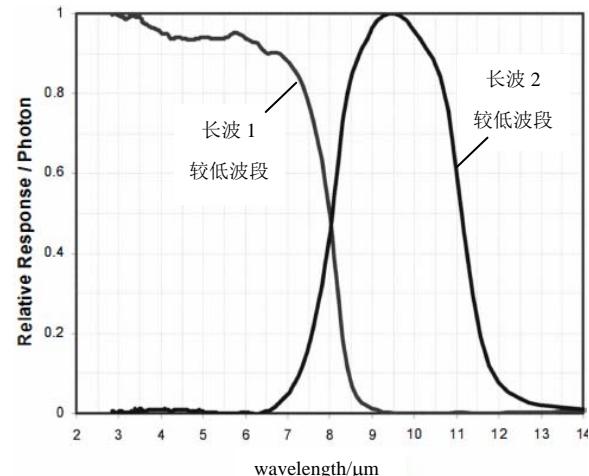


图2 RVS 双色长波/长波红外 FPA 响应曲线

Fig.2 LWIR/LWIR FPA spectral response curves at RVS

表2 CE-II型EKV红外传感器性能参数

Table 2 CE-II EKV infrared sensor performance

参数名称	量值
像元阵列	512×512
像元尺寸	$30\mu\text{m}\times30\mu\text{m}$
截止波长	$8\mu\text{m}/11\mu\text{m}$
工作温度	70K
量子效率	70%
可用像元	99%
材料	HgCdTe/CdZnTe
噪声等效辐照度	$1.2\times10^{11}\text{photon}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$
镜头通光孔径	25 cm
光圈	F/2.5
等效焦距	63 cm
视场角	1.4°
帧频	100 Hz
积分时间	8 ms
横向分辨率	4.76 m@100 km

除表2中所列性能参数,表征探测能力的关键参数还有探测率和探测距离。下面依次对这两个参数进行了计算分析。

3.2 探测率估算

峰值探测率与系统本身以及背景光子通量有关,计算公式为^[3]:

$$D^* = \frac{\lambda_p}{hc} \eta e \left[\frac{4kT}{R_0 A} + 2\eta e^2 Q_b \right]^{-1/2} \quad (1)$$

式中: D^* 为峰值探测率; λ_p 为峰值波长; h 为普朗克常数, $6.626\times10^{-34}\text{ Js}$; c 为光速, $3\times10^8\text{ m/s}$; η 为量

子效率; e 为电子电荷, 1.6×10^{-19} C; k 为玻尔兹曼常数, 1.38×10^{-23} J/K; T 为工作温度, K; $R_0 A$ 为零偏电阻面积积; Q_b 为背景光子通量。

背景光子通量计算公式如下:

$$Q_b = \sin^2(\theta/2) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{2\pi c}{\lambda^4 [\exp(hc/\lambda kT_b) - 1]} d\lambda \quad (2)$$

式中: θ 为视场角, rad; λ_1 为波长下限; λ_2 为波长上限; T_b 为背景温度。

对于 EKV 而言主要的背景辐射来自于探测器光学系统窗口玻璃的红外辐射, 需要考虑窗口玻璃的红外发射率:

$$Q_{b,o} = \sin^2(\theta/2) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\varepsilon_o 2\pi c}{\lambda^4 [\exp(hc/\lambda kT_o) - 1]} d\lambda \quad (3)$$

式中: $Q_{b,o}$ 为窗口玻璃产生的背景光子通量; ε_o 为窗口玻璃的红外辐射率; T_o 为窗口玻璃温度。

根据调研获得的 EKV 红外 FPA 以及光学系统的参数, 设置各计算参数如表 3 所示。计算得到峰值探测率为 2.7508×10^{10} m·Hz^{1/2}·W⁻¹。

表 3 EKV 红外传感器探测率计算参数

Table 3 Parameters for EKV infrared sensor detectivity calculation

参数名称	量值
峰值波长	10 μm
零偏电阻面积积	$1 \times 10^3 \Omega \cdot \text{cm}^2$
镜头视场角	1.4°
波长下限	9 μm
波长上限	11 μm
窗口玻璃的红外辐射率	0.2
窗口玻璃温度	300 K
系统带宽	62.5 Hz

3.3 探测距离估算

用光子数表示的等效噪声辐照度可以根据公式(4)和公式(5)转换为等效噪声功率。若已知系统带宽和比探测率, 等效噪声噪声功率还可以用公式(6)计算:

$$\text{NEFD} = \text{NEI} \cdot \frac{hc}{\lambda} \quad (4)$$

$$\text{NEP} = \text{NEFD} \cdot A_d \quad (5)$$

$$\text{NEP} = \frac{\sqrt{A_d \Delta f}}{D^*} \quad (6)$$

式中: NEI 为噪声等效辐照度; NEFD 为噪声等效流量密度; NEP 为噪声等效功率; A_d 为像元面积; Δf 为探测器等效噪声带宽。

根据调研获得的 CE-II 型 EKV 红外探测器的参数, 并设置计算参数如表 4 所示。根据表 2 中噪声等效辐照度计算得到的等效噪声功率为 2.1468×10^{-14} W; 而根据上文计算的峰值探测率计算得到的等效噪声功率为 8.6219×10^{-15} W。由于平均噪声等效辐照度是整个 FPA 所有像元的均值, 而峰值探测率是单个像元的理论计算值; 二者必然存在一定差异。测量的噪声等效辐照度实际上包含了其他因素的影响, 肯定较理论计算值更大。

表 4 EKV 红外传感器探测距离计算参数

Table 4 Parameters for EKV infrared sensor detection range calculation

参数名称	量值
目标的红外发射率	0.8
目标表面温度	280 K
目标等效红外辐射面积	0.7 m^2
波段内大气平均透过率	1.0
光学系统平均透过率	0.7

探测距离的大小与像元的噪声等效流量密度是直接相关的。计算时首先要根据目标的光子辐射度, 求出目标在波段范围内的辐射功率, 计算见公式(7)和公式(8)。而到达探测器单个像元上的流量密度要高于噪声等效流量密度的一个量级, 才能形成有效的探测信号。辐射能量从光学系统的镜头汇聚到单个像元上, 其流量密度会显著增大若干个量级, 即光学系统的增益。该增益与通光孔径和像元大小有关。根据公式(9)和公式(10), 即可计算出探测距离:

$$Q_t(\lambda, T_t) = \frac{\varepsilon_t 2\pi c}{\lambda^4 [\exp(hc/\lambda kT_t) - 1]} \quad (7)$$

$$J = A_t \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} Q_t(\lambda, T_t) \frac{hc}{\lambda} d\lambda \quad (8)$$

$$R^2 = \frac{\tau_a \tau_o \cdot J \cdot G_o}{4\pi \cdot \text{SNR} \cdot \text{NEFD}} \quad (9)$$

$$G_o = \frac{A_o}{A_d} = \frac{\pi D_o^2}{4 A_d^2} \quad (10)$$

式中: Q_t 为目标光子辐射度; ε_t 为目标的红外发射率; T_t 为目标表面温度; A_t 为目标等效红外辐射面积; J 为目标在探测波段内的平均辐射功率; R 为探测距离; G_o 为探测器光学系统增益; A_o 为探测器通光面积; D_o 为通光孔径; τ_a 为距离 R 处探测波段内的平均大气透过率; τ_o 为探测器光学系统的平均光谱透过率; SNR

为探测器最小捕获信噪比,这里取10。

用 $NEI=1.2\times10^{11}\text{ photon}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 计算得到的探测距离为557.5 km;而用 $D^*=2.7508\times10^{10}\text{ m}\cdot\text{Hz}^{1/2}\cdot\text{W}^{-1}$ 计算得到的探测距离为879.8 km。从信号处理的角度,所有像元会设置相同的噪声限,因此用实际测量的平均NEI计算得到的探测距离应当更接近实际的探测能力。

4 结论

CE-II型EKV红外传感器在像元阵列、视场角和帧频方面应当有明显提升。由于视场角增大,探测率较之前型号有所提高,峰值波长10 μm对应的探测率为 $2.75\times10^{10}\text{ m}\cdot\text{Hz}^{1/2}\cdot\text{W}^{-1}$,计算得到的探测距离约为880 km。而用实测的噪声等效辐照度计算得到的探测距离为558 km。由此估计CE-II型EKV的实际探测距离应当在500 km水平。

参考文献:

- [1] 王忆锋,马钰.论红外焦平面器件的串音[J].红外,2014,35(1):1-8.
WANG Yifeng, MA Yu. On the crosstalk of infrared focal plane array[J].
Infrared, 2014, 35(1): 1-8.
- [2] 王忆锋,李培智,刘黎明,等.甚长波碲镉汞红外探测器的发展[J].
红外技术,2012,34(7):373-382.
WANG Yifeng, LI Peizhi, LIU Liming, et al. Developments of very long

wavelength mercury cadmium telluride infrared detectors[J]. *Infrared Technology*, 2012, 34(7): 373-382.

- [3] Blazejewski E R, Williams G M, McLevige W V, et al. Advanced LWIR HgCdTe detector for strategic applications[C]//SPIE, 1994, 2217: 278-290.
- [4] Rogalski A. Infrared detectors for the future[J]. *Acta Physica Polonica A*, 2009, 116(3): 389-406.
- [5] Herring J, Bollengier L, Madajian D. Staring 256×256 LWIR focal plane array performance of the Raytheon exoatmospheric kill vehicle[R]. Raytheon Infrared Center of Excellence, 1998.
- [6] Smith E P G, Pham L T, Venzor G M, et al. HgCdTe focal plane arrays for dual-color mid-and long-wavelength infrared detection[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2004, 33(6): 509-516.
- [7] Smith E P G, Bornfreund R E, Kasai I, et al. Status of two-color and large format HgCdTe FPA technology at Raytheon vision systems[C]//Proc. of SPIE, 2006, 6127: 61271F.
- [8] Smith E P G, Gallagher A M, Venzor G M, et al. Large-format HgCdTe focal plane arrays for dual-band long-wavelength infrared detection[J]. *Phys. Status Solidi*, 2010(10): 2522-2525.
- [9] SMITH E P G, VENZOR G M, GALLAGHER A M, et al. Large-format HgCdTe dual-band long-wavelength infrared focal-plane arrays[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2011, 40(8): 1630-1636.