

基于 MATLAB 红外双波段成像探测器性能仿真

张 磊, 孙维国, 陈洪许, 孟 超, 彭 晶

(中国空空导弹研究院, 河南 洛阳 471009)

摘要: 红外双波段成像探测器能接收目标和干扰源在两个波段上的辐射能量。从普朗克黑体辐射定律出发, 根据 MATLAB 软件模拟出的目标和干扰源的辐射特性来选择 SW/MW 两个红外波段。首先利用仿真程序计算 InSb 面阵探测器对于点黑体和面黑体的响应结果, 由计算结果和测试结果较好的一致性, 说明设计的 MATLAB 仿真程序具有实用性。再从实际研制的 HgCdTe 128×128 叠层式双波段器件结构考虑, 通过一定的变换, 利用仿真程序对 HgCdTe SW/MW 双波段成像探测器进行参数性能仿真, 达到利用成像及双色比来区分目标和干扰的目的。

关键词: 双波段; MATLAB; HgCdTe; 叠层式结构; 双色比

中图分类号: TN215 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2010)01-0011-06

Performance Simulation of Dual Band IR Imaging Detector Based on MATLAB

ZHANG Lei, SUN Wei-guo, CHEN Hong-xu, MENG Chao, PENG Jing

(China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009, China)

Abstract: Dual band IR imaging detector can be responsive to two correlated spectrum of the target and the flare. Based on Planck's law of blackbody radiation, according to the radiation characteristic of the target and the flare simulated by MATLAB, the SWIR/MWIR band is chose. First we calculate the response results of InSb IRFPA to the cavity blackbody and the extended area blackbody, because the simulated results are consistent with the tested results. The simulation procedure is of practical value. Then consideration of the HgCdTe 128×128 detector pixels are stacked, simulating the performance parameters of HgCdTe SW/MW dual band IR imaging detector with MATLAB procedures. The purpose of distinguishing the target from the flare with image and dual band ratio can be achieved.

Key words: dual band, MATLAB, HgCdTe, pixels are stacked, dual band ratio

引言

目前, 以具有双波段同时工作能力为代表的第三代红外成像探测器正在研制和发展中。相比于单波段成像探测器, 红外双波段成像探测器可以接收目标和干扰在两个波段上的红外辐射信息, 由于二者具有不同的双色比, 从而利用双色比的不同就可以区分目标和干扰^[1]。

对于红外双波段面阵探测器的测试我们将采用和单波段成像探测器相同的测试条件, 本性能仿真软件就是基于单波段成像探测器测试系统的测试流程, 从基本原理出发, 把 HgCdTe 叠层双波段面阵探测器的能量转换过程作了整体的分析与计算, 理论上达到能够利用成像及双色比区别目标和干扰源的目的, 实

际过程中达到能够优化 HgCdTe SWIR/MWIR 双波段成像探测器研制及测试进程的目的。

1 理论分析

1.1 黑体辐射出射度和光子通量密度的计算

由普朗克黑体辐射定律^[2]可知: 黑体辐射出射度与波长、绝对温度之间满足如下关系式:

$$M_{eb}(\lambda, T) = \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \left[\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]^{-1} \quad (1)$$

式中: $c_1 = 2\pi hc^2 = 3.741832 \times 10^4 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\mu\text{m}^4$, 为第一辐射常数; $c_2 = hc/k = 1.438786 \times 10^4 \mu\text{m}\cdot\text{K}$, 为第二辐射常数。

利用(1)式可以计算黑体在波段 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 内的辐射

出射度, 分别以 λ_2 、 λ_1 为积分上、下限对(1)式进行积分, 即对于温度为 T 的黑体, 其在波段 $\Delta\lambda=\lambda_2-\lambda_1$ 内的辐射出射度为:

$$M(\Delta\lambda, T) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_{\text{eb}}(\lambda, T) d\lambda \quad (2)$$

计算(2)式可以通过 MATLAB 中的数值积分函数 quad、quadl 或 trapz^[3]来实现。

普朗克辐射定律还可以用光子流的形式表示。根据光的量子理论, 一个频率为 ν 的光子的能量为 $\varepsilon_0=h\nu=hc/\lambda$, 将式(1)用 ε_0 除, 可得:

$$Q_{\text{eb}}(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^4} \cdot \left[\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]^{-1} \quad (3)$$

式中: $C_1=2\pi c=1.883652 \times 10^{23} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \mu\text{m}^3$; $c_2=hc/k=1.438786 \times 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K}$ 。式(3)就是以光子流形式表示的普朗克定律。

利用(3)式可以计算黑体在波段 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 内辐射的光子通量密度, 分别以 λ_2 、 λ_1 为积分上、下限对式(3)进行积分, 即对于温度为 T 的黑体, 其在波段 $\Delta\lambda=\lambda_2-\lambda_1$ 内的光子通量密度为:

$$Q(\Delta\lambda, T) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} Q_{\text{eb}}(\lambda, T) d\lambda \quad (4)$$

同样的, 计算式(4)可以利用 MATLAB 中的数值积分函数 quad、quadl 或 trapz^[3]实现。

1.2 目标和干扰辐射特性仿真

对于飞机目标, 从红外物理角度分析, 其可供探测和识别的辐射源有两部分组成: 一是包括发动机尾喷管、尾焰和蒙皮在内的目标自身的热辐射; 二是目标对背景的反射辐射^[1], 由此决定的目标辐射的等效温度在 500~800 K 之间, 仿真计算时取目标黑体温度为 650 K。黑体温度为 650 K 时, 利用 MATLAB 计算其辐射特性如图 1 所示。

干扰弹可探测的部分来自于其燃烧时释放的辐射能, 等效温度在 2000~2300 K 之间, 考虑到测试时黑体实际能达到的温度, 取干扰黑体温度为 1700 K, 由此计算干扰辐射能量分布如图 2 所示。

从目标和干扰辐射特性分布可知, 目标辐射能量集中在 1~3 μm 和 3~5 μm 两个波段, 峰值位于 3~5 μm 波段内, 干扰辐射能量也在 1~3 μm 和 3~5 μm 波段内较强, 但峰值波长在 1~3 μm 波段, 所以从双色比稳定性考虑, 选 1~3 μm 和 3~5 μm 这两个波段组合。另外, 从大气红外透射窗口出发, 仿真和实际测试时我们选取的两个波段为 1.6~2.5 μm 和 3.7~4.8 μm。

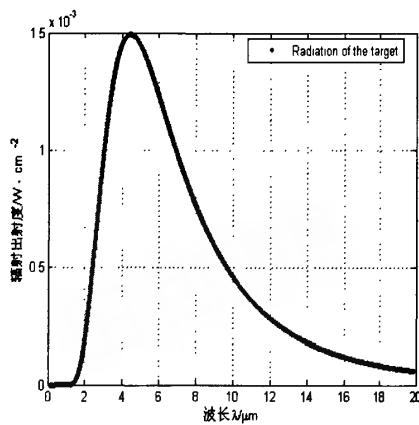


图 1 目标辐射能量分布
Fig.1 Radiation of the target

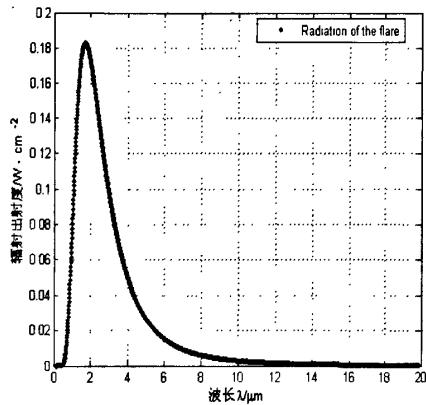


图 2 干扰辐射能量分布
Fig.2 Radiation of the flare

1.3 器件结构分析

和仿真对应的器件是叠层式结构的 HgCdTe 双波段面阵探测器, 其光敏元结构剖面如图 3 所示, 光电流输出如图 4 示。从原理上来看^[4,5], Hg_{1-x}Cd_xTe 双波段面阵探测器的光敏元实际上是纵向上的两个背靠背的光电二极管, 其中短波光敏元尺寸为 50 μm × 50 μm, 中波光敏元尺寸为短波光敏元的 3/4。当红外辐射从背面入射到双波段探测器上时, 穿过透明衬底, SW 辐射在第一个结的吸收区先被吸收, 光生载流子被 SW 光电二极管的 p-n 结分开, 其光电流信号由 SW 电极②和列阵公共电极③输出; MW 辐射透过第一个 p-n 结继续前进, 到达 MW 吸收层被吸收, 光生载流子被 MW 光电二极管的 p-n 结分开, 光电流信号由 MW 电极①和 SW 电极②输出, 所以每个单元有两个电极①和②, 每个单元最靠近衬底的 n 层是相通的, 形成器件阵列的公共电极③, SW 的电极②是 SW 和 MW 光电二极管的公共电极。这种光敏元结构可以使

SW 和 MW 光电二极管各自选择最佳偏压, 且能同时、独立地输出光电流信号。

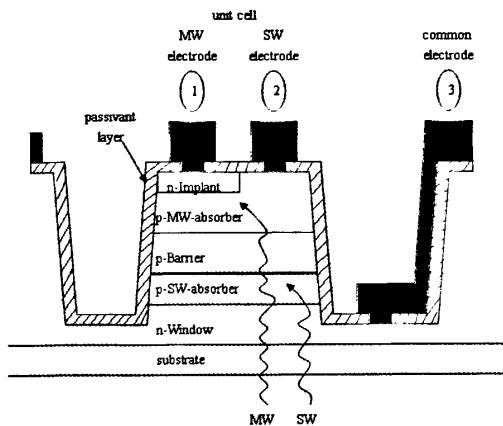


图 3 HgCdTe SW/MW 双波段面阵探测器光敏元结构

Fig.3 Unit cell for HgCdTe SW/MW dual band IRFPA detector

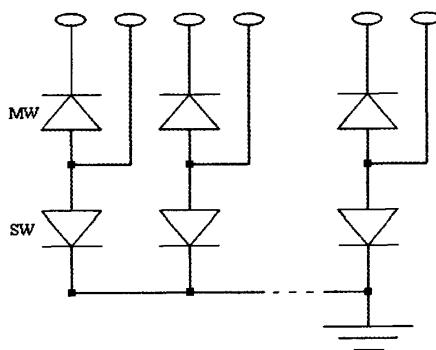


图 4 HgCdTe 双波段面阵探测器光电流输出原理图

Fig.4 Photo-generated current readout circuit of HgCdTe dual band IRFPA

2 软件设计分析

基于探测器光电转换的基本原理^[6], 仿真计算是从黑体辐射的普朗克定律出发, 按照信号转移过程来进行的, 响应率计算流程图如图 5 所示。先利用黑体辐射普朗克定律计算出黑体的辐射出射度, 再通过变换计算入射到探测器光敏面的辐照度, 由此算出入射到光敏面的光功率。另一方面, 由普朗克定律算出黑体辐射的光子通量密度, 通过系统传输计算入射到探测器光敏面的光子通量密度, 再转换为光生电流强度, 最后由积分电容转换为信号电压输出, 由信号电压和入射的光敏面辐照功率计算探测器的响应率。

探测率的计算流程如图 6。焦平面探测器总噪声电压等于瞬态噪声电压和空间噪声电压的和, 瞬态噪声电压等于光子噪声电压、暗电流噪声电压及读出噪

声电压之和。计算探测率时, 先分别算出光子噪声电压、暗电流噪声电压和读出噪声电压, 进而计算瞬态噪声电压, 再计算出空间噪声电压, 即可算出总噪声电压, 最后计算探测率。

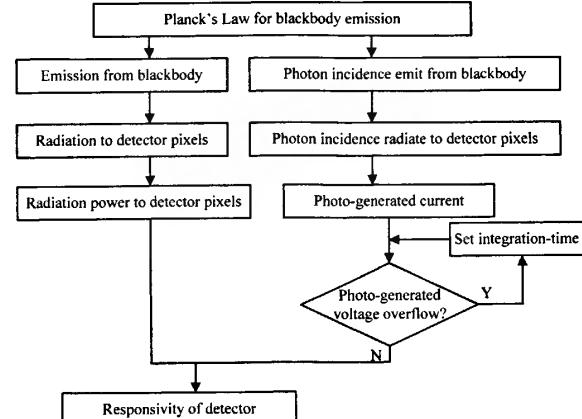


图 5 响应率仿真程序流程图

Fig.5 Flow chart of responsivity simulation program

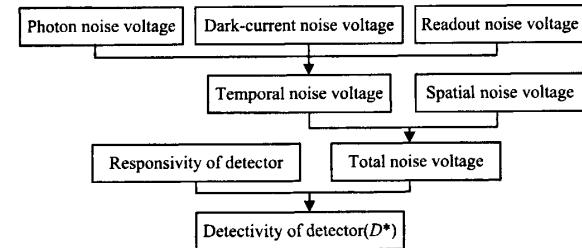


图 6 探测率 (D*) 计算流程图

Fig.6 Flow chart of detectivity simulation

3 仿真结果与讨论

为了检验设计的仿真程序的可行性, 先用仿真程序对 InSb 单波段成像探测器在两种条件下进行参数仿真并与其实际测试数据对比。

1) 面黑体实际测试条件如下:

- (1) 面黑体: 75 mm × 75 mm;
- (2) 黑体温度: 305 K 和 300 K;
- (3) 黑体到光敏面距离: 30 mm;
- (4) InSb 探测器响应波段: 3.7~4.8 μm;
- (5) F 数: 1.82;
- (6) 饱和光生电压: 3.6 V;
- (7) 积分时间: 300 μs。

针对硬件测试条件, 相应的软件上利用仿真程序在理论上对同一波段进行响应计算, 二者结果如下表 1, 选取两个实际测试数据和仿真结果进行对比。

2) 点黑体实际测试条件:

- (1) 点黑体: 孔径 10 mm;
- (2) 黑体温度: 500 K;
- (3) 背景温度: 300 K;
- (4) 黑体到探测器距离: 300 mm;
- (5) InSb 探测器响应波段: 1.0~5.5 μm;
- (6) F 数: 0.77;
- (7) 饱和光生电压: 3.6 V;
- (8) 积分时间: 100 μs。

同样地, 将两个器件实际测试结果和仿真计算结果对比于下表 2。

在进行光生电流、电压仿真计算时, 按理想状态计算的, 没有考虑光敏元之间的光电串扰及测试环境变化的影响, 这样计算出的光生电压会比实际测试的小, 从而响应率也会小于实际测试值。而在仿真计算噪声电压时, 由于实际测试过程中噪声的随机性, 计算只是从探测器本身来考虑的, 忽略了测试系统噪声的影响, 计算出的噪声电压会小实际测试的噪声电压很多, 这样计算出的探测率就大于实测的值。由上两

组数据对比可见, 在忽略光电串扰和测试系统噪声的情况下, InSb 探测器通过仿真的计算结果和其实际测试的数据具有较好的一致性, 表明设计的 MATLAB 程序具有一定的实用性, 通过一定的变量替换将其用于仿真 HgCdTe 双波段探测器是可行的。

对于 HgCdTe 叠层式红外双波段面阵探测器, 从测试条件考虑, 将选用点黑体进行实际测试, 按照和实际测试相同的流程, 仿真计算条件控制如下:

- (1) 点黑体: 孔径 10 mm;
- (2) 黑体温度: $T_1=1700$ K (干扰)、 $T_2=650$ K (目标) 和 $T_3=300$ K (背景);
- (3) 黑体到探测器距离: 300 mm;
- (4) 响应波段: 1.6~2.5 μm 和 3.7~4.8 μm;
- (5) 饱和光生电压: 3.6 V;
- (6) 积分时间: 50 μs。

这里为了便于比较, 两个波段的积分电容选同样大小, 且取为 1.50 pF。仿真计算结果如下表 3 所示。

表 1 面黑体实测数据和仿真计算结果对比

Table 1 Comparison of tested datas and simulated results of extended area blackbody

	Peak voltage responsivity/(V/W)	Peak detectivity/(cm·Hz ^{1/2} ·W ⁻¹)
Tested results	1.05×10^9	2.22×10^{11}
	8.90×10^8	2.14×10^{11}
Simulated results	5.24×10^8	2.30×10^{11}

表 2 点黑体实测数据和仿真结果对比

Table 2 Comparison of tested datas and simulated results of cavity blackbody

	Peak voltage responsivity/(V/W)	Peak detectivity/(cm·Hz ^{1/2} ·W ⁻¹)
Tested results	2.95×10^8	1.10×10^{11}
	4.03×10^8	1.25×10^{11}
Simulated results	1.75×10^8	7.64×10^{11}

表 3 HgCdTe 红外双波段面阵探测器参数仿真结果

Table 3 Simulated results of HgCdTe dual band IR FPA

	$T_1=1700$ K (Flare)		$T_2=650$ K (Target)	
	1.6~2.5 μm	3.7~4.8 μm	1.6~2.5 μm	3.7~4.8 μm
Emission from blackbody/(W·cm ⁻²)	14.8959	4.8025	0.0215	0.1609
Radiation to pixels/(W·cm ⁻²)	2.689×10^{-3}	8.669×10^{-4}	3.879×10^{-6}	2.904×10^{-5}
Photon incidence/(ph·cm ⁻² ·s ⁻¹)	1.520×10^{20}	1.012×10^{20}	2.396×10^{17}	3.448×10^{18}
Photo-generated current/μA	0.0818	0.0409	1.289×10^{-4}	1.392×10^{-3}
Photo-generated voltage/V	2.726	1.362	4.297×10^{-3}	0.0464
Dual band ratio	2.0018		0.0926	
Responsivity/(V/W)	4.056×10^7	6.284×10^7	4.431×10^7	6.388×10^7
Noise voltage/V	4.890×10^{-4}	3.994×10^{-4}	3.346×10^{-5}	7.843×10^{-5}
Detectivity/(cm·Hz ^{1/2} ·W ⁻¹)	4.147×10^{10}	7.866×10^{10}	6.621×10^{11}	4.072×10^{11}

按照上述仿真计算条件, 对于同一波段, 其响应输出电压及双色比与黑体温度关系如图 7 所示, 图中纵坐标既作为输出电压刻度轴, 也作为双色比坐标轴。由图可见, 随着黑体温度的升高, 两个波段响应的输出电压均增大, 但增加的速度不同, $1.6\text{--}2.5\mu\text{m}$ 波段输出电压增加的快, 从而使得双色比随之增大, 由表 3 可知, 650 K 的黑体对两个波段响应双色比为 0.0926, 1700 K 时黑体两个波段的响应双色比为 2.0018, 反映在灰度图上如图 8 和图 9 所示, 两图左边为 $1.6\text{--}2.5\mu\text{m}$ 响应的灰度图, 右侧为 $3.7\text{--}4.8\mu\text{m}$ 响应灰度图。由图 8 和图 9 可见, 两幅灰度图对比度有着明显不同, 1700 K 黑体在 $1.6\text{--}2.5\mu\text{m}$ 波段响应大, 而 650 K 黑体在 $3.7\text{--}4.8\mu\text{m}$ 波段响应大。当黑体温度 650 K 时, 其辐射峰值波长约为 $4.46\mu\text{m}$, 能量集中在中红外波段, 响应输出电压主要来自于中红外波段的辐射能量, 从而 $3.7\text{--}4.8\mu\text{m}$ 波段输出响应较大, 即图 8 中右侧较亮。温度升高到 1700 K 时, 辐射峰值波长约为 $1.7\mu\text{m}$, 处于近红外波段, 也就是随着黑体温度的升高, 其辐射峰值波长向短波段方向移动, 能量也向短波段集中, 响应输出电压主要来自于近红外波段的能量, 这样波段 $1.6\text{--}2.5\mu\text{m}$ 的响应电压会大于波段 $3.7\text{--}4.8\mu\text{m}$ 的响应输出电压, 反映在灰度图上即图 9 左侧灰度图较亮, 这就可以从表象上来区别目标和干扰。

由上分析可见, 不同于单波段成像探测器, 双波段成像探测器可以利用双色比来区别目标和干扰, 在抗干扰方面又提供了一个可靠的性能参数, 从而提高了探测器探测精度, 为新一代制导武器系统的研制奠定了良好的基础。

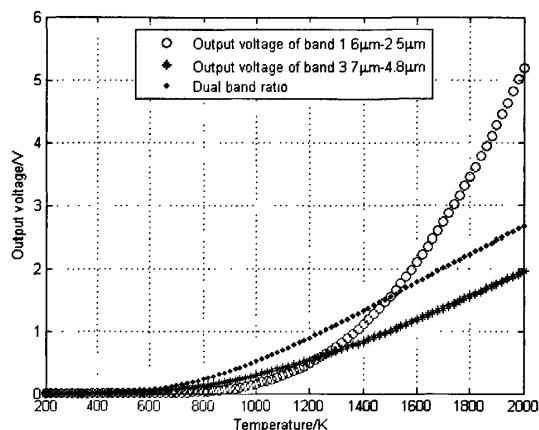


图 7 输出电压与黑体温度关系曲线

Fig.7 Relationship between output voltage and temperature of blackbody

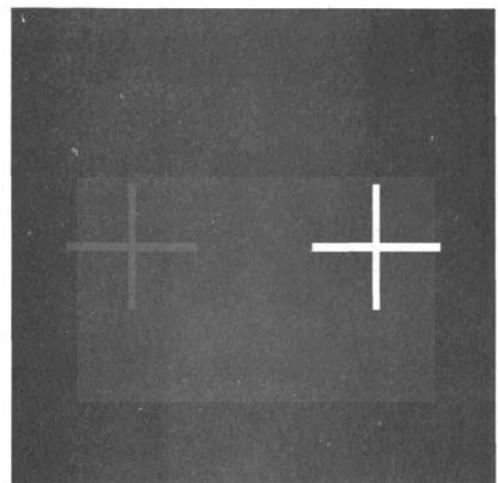


图 8 目标黑体双波段响应信号灰度图 (左侧为近红外响应, 右侧为中红外响应)

Fig.8 Dual band output gray image of target blackbody (the left is the NIR response, the right is the MIR response)

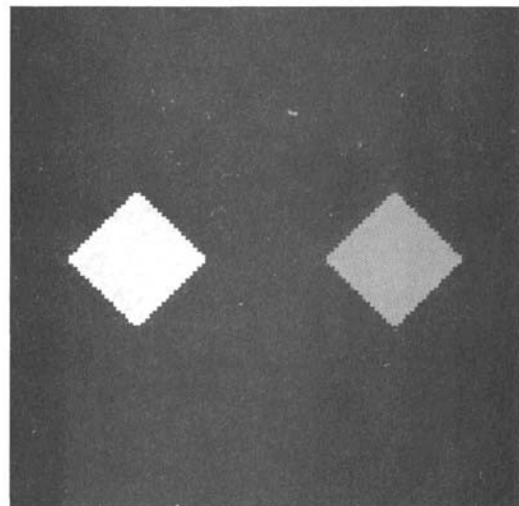


图 9 干扰黑体双波段响应信号灰度图 (左侧为近红外响应, 右侧为中红外响应)

Fig.9 Dual band output gray image of flare blackbody (the left is the NIR response, the right is the MIR response)

4 结束语

对于 HgCdTe 叠层式双波段面阵探测器, 由于其集成性能较好, 这方面的研制将进一步推动探测器技术的发展, 同时也大大提高新一代制导武器系统精确制导精度。HgCdTe 叠层式双波段面阵探测器的参数性能仿真, 由于和实际测试数据具有较好的一致性, 具备一定的理论意义, 将对双波段面阵探测器的研制

及测试起到指导性的作用，优化研制及测试进程。

参考文献：

- [1] 李丽娟, 黄士科, 陈宝国. 双色红外成像抗干扰技术[J]. 激光与红外, 2006, 36(2): 141-143.
- [2] 江月松. 光电技术与实验[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2000.
- [3] 曹弋. MATLAB 教程及实训[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [4] 叶振华, 吴俊, 胡晓宁, 等. 集成式 HgCdTe 红外双色探测器列阵[J]. 红外与毫米波学报, 2004, 23(3): 193-196.
- [5] 丁瑞军, 叶振华, 周洪文, 等. 双色红外焦平面研究进展[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(1): 14 -16.
- [6] 孙维国, 黄水安. 空空导弹光电探测器设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- [7] 张志涌. 精通 MATLAB6.5[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2002.