

中长波双色目标和干扰模拟仿真技术

宋敏敏, 赫崇域, 吉亚平, 周泽亚, 桑学仪, 李 建, 刘明娜

(上海航天控制技术研究所, 上海 201109)

摘要: 为了能评估中长波红外双色探测系统抗干扰性能,对双色目标和干扰模拟仿真技术开展了研究。基于多波段红外目标以及干扰生成技术,建立多波段目标和干扰光谱辐射模型、运动模型。同时,基于中长波双色半实物仿真系统,通过 MOS 电阻阵+DMD 目标模拟器构成的中长波红外图像模拟器,多通道复合定向光学系统以及安装被测探测系统的弹目姿态模拟系统,将目标模拟器生成的中长双色图像经多通道复合定向光学系统复合、准直、扩束后提供给被测双色探测系统,验证仿真模拟效果。

关键词: MOS 电阻阵; DMD 目标模拟器; 半实物仿真; 红外干扰

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20210208

Simulation technology of medium and long wave dual color target and jamming

Song Minmin, He Chongyu, Ji Yaping, Zhou Zeya, Sang Xueyi, Li Jian, Liu Mingna

(Shanghai Aerospace Control Technology Institute, Shanghai 201109, China)

Abstract: In order to evaluate the anti-jamming performance of the medium and long wave infrared dual-color detecting system, the dual-color target and interference simulation technology were studied. Based on multi-band infrared targets and interference generation technology, the multi-band target and jamming spectral radiation model and motion model were established. At the same time, based on the medium and long wave dual-color hardware-in-the-loop simulation system, through the medium and long wave infrared image simulator composed of MOS resistance array and DMD target simulator, multi-channel compound directional optical system and missile target attitude simulation system with the detection system under test, the medium and long dual-color image generated by the target simulator was compounded, collimated and processed by multi-channel compound directional optical system. After beam expansion, it is provided to the dual-color detection system to verify the simulation effect.

Key words: MOS resistance arrays; DMD target simulator; hardware-in-the-loop simulation; infrared jamming

收稿日期:2021-03-31; 修订日期:2021-06-21

基金项目:国家部委基金

作者简介:宋敏敏,男,高级工程师,硕士,主要从事仿真测试技术方面的研究。

0 引言

随着光电对抗技术的不断发展,诱骗红外探测系统的能力及方式也逐渐多样化、复杂化,促使探测系统的抗干扰能力也要不断进步和发展。而红外双色复合导引模式能够取长补短,有效解决单一导引模式自身使用条件限制问题^[1],提升导弹全天时/全天候适应能力、反隐身/抗干扰能力,提高打击目标精度。同时,多光谱干扰技术近年来也正迅猛发展,为了能在复杂战场环境中发挥作战效能,在双色探测系统研制、开发、设计等阶段,需要采用相应的方法对抗干扰性能进行模拟、仿真及测试等实验验证^[2-4]。而国内现阶段缺少中长双色半实物验证手段,典型目标、自然背景以及人工干扰多光谱特征半实物模拟逼真度有待验证。

文中基于中长波双色探测系统抗人工干扰性能

验证需求^[5-7],对中长波双色目标和红外诱饵模拟仿真技术^[8]进行研究和分析。建立某型战机和某型坦克目标中长波红外辐射模型,同时搭建红外诱饵中长波红外辐射模型以及运动模型。最后,基于中长波双色半实物仿真系统输出典型目标投放红外诱饵中长波红外仿真图像给某中长波双色产品,完成模拟仿真效果验证。

1 中长波双色半实物仿真系统

1.1 系统组成

中长双色半实物仿真系统由双色目标模拟器,包括中波 MOS 电阻阵目标模拟器和长波 DMD 红外成像模拟器,目标模拟器控制台与控制计算机、弹体姿态控制台与控制计算机、主控计算机以及产品接口计算机组成,以 VMIC 网络为通讯介质,构成分布式实时半实物仿真系统^[8-11],具体组成如图 1 所示。

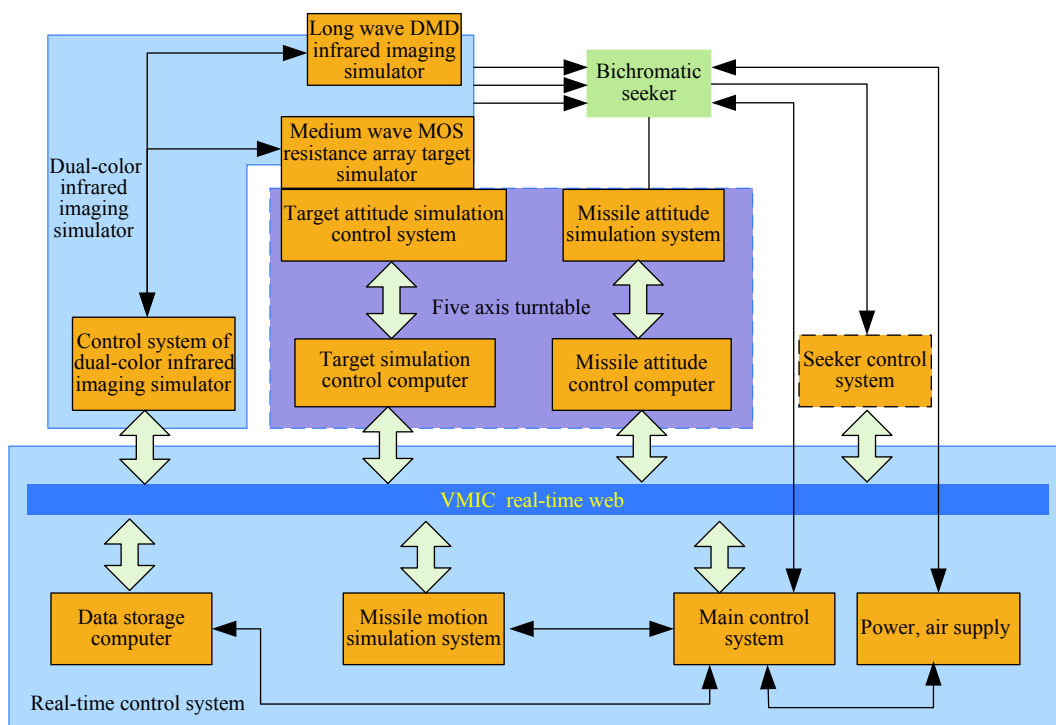


图 1 中长双色半实物仿真系统

Fig.1 Medium and long wave dual-color hardware-in-the-loop simulation system

如上图所示,主控制系统可以同步控制弹体姿态模拟系统、目标姿态模拟系统、双色红外成像模拟器控制系统、弹体运动模拟系统以及探测系统的控制系统。通过弹体运动模拟系统设置不同弹道参数生成

弹体和目标姿态模拟系统的控制指令、生成双色红外成像模拟器控制系统的目标与导弹运动参数,开展各典型弹道动态仿真。双色红外成像模拟器控制系统可设置双色目标/干扰模拟的控制参数,包括目标、干

扰类型以及干扰投射参数、导弹飞行时目标的能量变化参数等;弹体姿态模拟系统和目标姿态模拟系统可以模拟目标相对导弹运动的视线角速度;探测系统的控制系统完成双色探测系统上电启动,控制探测系统实现陀螺指向搜索、跟踪,同时能够实时采集仿真过程中探测系统的相关输入输出信息,实时完成探测系统状态参数设置和工作状态控制。

1.2 双色成像原理

中长双色半实物仿真系统核心部分是双色红外成像模拟器控制系统,由中波 MOS 电阻阵目标模拟器、长波 DMD 红外成像模拟器、双色通道定向复合光学系统组成,其双色红外成像原理示意图如图 2 所示。

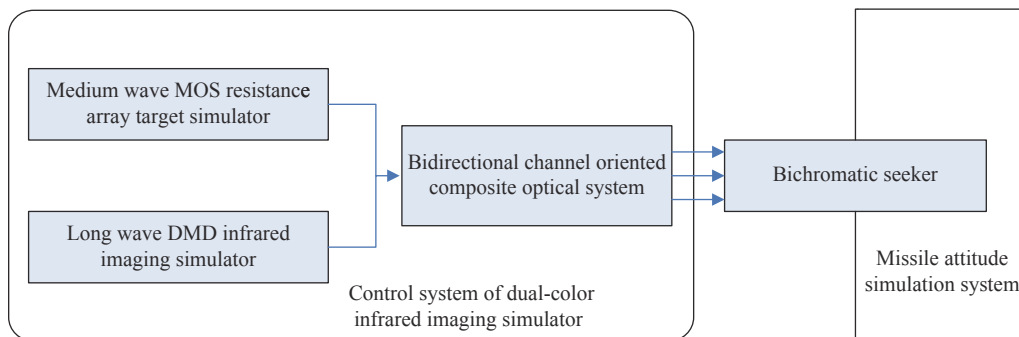


图 2 双色成像原理

Fig.2 Principle of dual-color imaging

中波 MOS 电阻阵^[9-10]目标模拟器采用 MOS 电阻阵作为核心器件,每个像素可单独控制加热,不需要照明光源,辐射温度范围大,具备模拟中波红外波段成像的优势。同时,国内 MOS 电阻阵列规模已经达到 512×512,帧频最高达 200 Hz,五年内 MOS 电阻阵分辨率将达到 1024×1024;长波 DMD 红外成像模拟器,采用数字微镜阵列 (Digital Micro mirror Device) 作为核心器件,以可控温的面源黑体作为光源,采用反射式原理,通过对 DMD 芯片的调制输出动态图像。分辨率高,可达 1024×768 或更高,模拟辐射温度范围相对较小,一般为常温 ~ 100 ℃,为此用来模拟长波红外波段成像。

双色通道定向复合光学系统包含三反系统、双通道复合扩束场镜。其作用是将中波 MOS 电阻阵以及长波 DMD 系统产生的红外辐射通过透镜合成光束经过第一平面反射镜、第二平面反射镜、第一主反射镜、第二反射镜以及扩束场镜完成三次反射,入射合成光束通过双通道复合定向光学系统复合、准直、扩束后出射提供给双色探测系统入瞳面,双色合成出射光束达到系统完善耦合的目的,详细过程如图 3 所示。

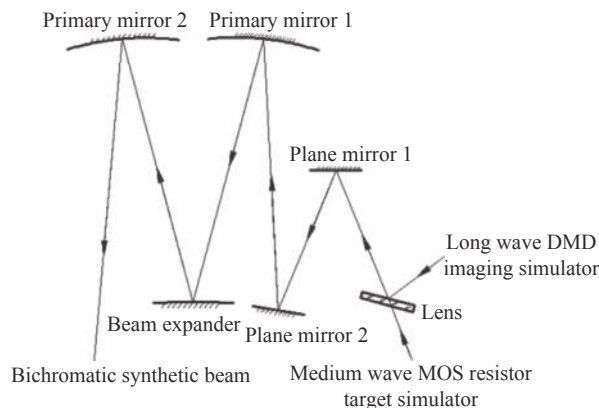


图 3 双色通道定向复合光学系统工作原理

Fig.3 Working principle of dual-color channel directional composite optical system

2 双色目标和干扰模拟

2.1 典型目标

(1) 建模过程

以典型战机目标为建模对象,采用理论计算与测试数据相融合的建模方法,流程如图 4 所示。

整个建模过程分为三维物理模型建模、流场仿真计算和红外辐射模型建模三个部分,流程如图 4 所示;首先根据查阅相关资料获得的某典型战斗机物理

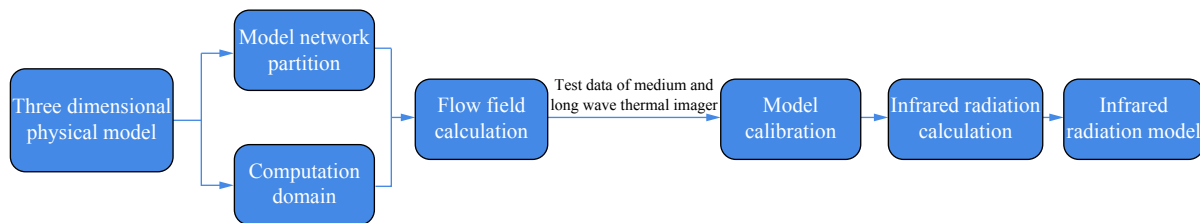


图 4 战机目标建模过程

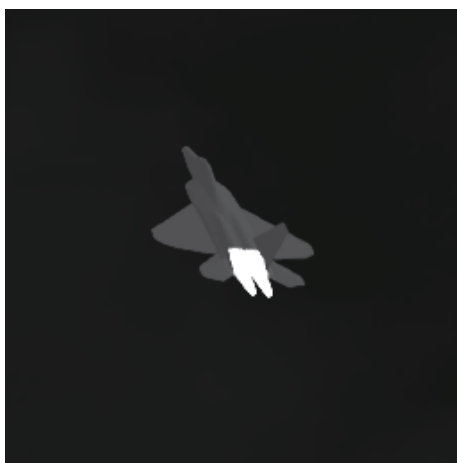
Fig.4 Aircraft modeling process

结构参数,使用 CAD 建模软件构建三维物理模型。在对发动机建模过程中进行了简化处理,因为发动机红外辐射特征主要来自于高温壁面和高温尾喷流,而从发动机后视可探测角度,仅可看到高温涡轮叶片和尾喷管,燃烧室、压气机等高温部件被涡轮叶片遮挡,因此在不影响计算结果的前提下,通过构建涡轮叶片及其后的尾喷管来作为简化的发动机模型,可有效提升建模效率。然后使用 CFD 流场计算软件对所构建的战斗机物理模型进行网格划分和流场计算,在网格划分时使用了六面体非结构网格,并在机身壁面和尾喷口附近进行了加密处理,经过了网格独立性验证。

流场计算时选用半径为两倍机身长度,轴线长度为十倍机身长度的圆柱体外流场计算域,机身置于外流场计算域中间。流场计算完成后,对比实测数据,修正相关边界条件,重新迭代计算。将流场计算结果导入研究室自主开发的飞行器红外特征计算分析软件,完成模型的中波/长波红外辐射特征计算,最终完成目标红外辐射模型的构建。

(2) 仿真效果

在典型空背景下,某飞机中长波仿真效果如图 5 所示。



(a) 中波红外飞机仿真
(a) Medium wave infrared aircraft simulation



(b) 长波红外飞机仿真
(b) Long wave infrared aircraft simulation

图 5 中长波红外飞机仿真效果模拟

Fig.5 Simulation effect of medium and long wave infrared aircraft

2.2 红外诱饵模拟

在实际仿真过程中,红外诱饵^[11]模拟包括辐射模拟以及运动模拟。

2.2.1 辐射模拟

通过外场静态与动态测试获取典型红外诱饵辐射变化特性^[12],现有型号的红外诱饵弹辐射波段已经

覆盖 1~14 μm 全红外波段,辐射强度:静态 ≥ 2 000 W/sr,动态 ≥ 1 000 W/sr,辐射压制比一般大于 3,机载红外诱饵持续燃烧时间为 4 s 左右。基于红外热像仪等标准仪器可以采集得到红外诱饵燃烧辐射特性数据,经过大量统计分析,红外诱饵辐射随时间变化特性可以归纳近似为两种,具体如图 6 所示。

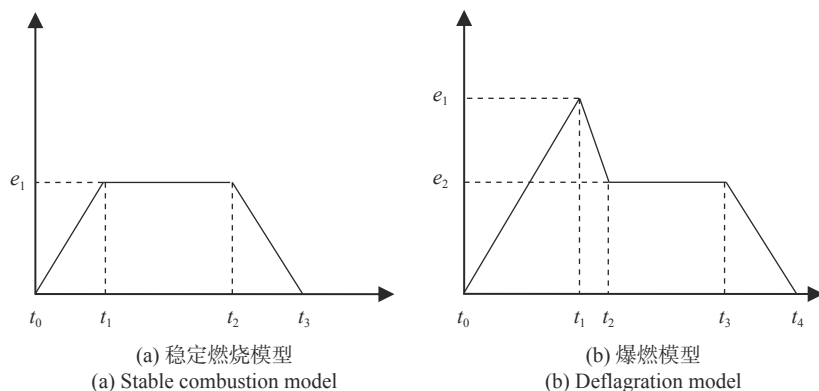


图 6 干扰辐射统计

Fig.6 Jamming radiation statistics

如图 6 所示, 图中的时间点表示红外诱饵燃烧的
几个阶段, 具体如表 1、表 2 所示。

表 1 稳定燃烧

Tab.1 Stable combustion model

Time	Description of combustion phase
t_0-t_1	Jamming start burning to peak value e_1 , <0.1 s
t_1-t_2	Stable stage of peak value e_1 , <3 s
t_2-t_3	Extinction phase of Jamming, <2 s

表 2 爆燃模型

Tab.2 Deflagration model

Time	Description of combustion phase
t_0-t_1	Jamming start burning to peak value e_1 , <0.1 s
t_1-t_2	Rapid decline phase after peak value e_1 , <0.06 s
t_2-t_3	Stable stage of down to e_2 , <2 s
t_3-t_4	Extinction phase of jamming, <2 s

2.2.2 运动模拟

红外诱饵从目标机上投放到空中, 其引燃药点火后迅速燃烧, 形成强辐射目标诱骗导弹, 分析红外诱饵出射速度以及出膛后受到的重力、风力、阻力等因素, 建立分红外诱饵的运动轨迹数学模型。

在地面坐标系下, 令载机速度为 v_i , 红外诱饵发射速度为 v_f (其为机体坐标系), 而 v_i 和 v_f 的矢量合成就是红外诱饵在投放时刻的速度 v_e , 而且红外诱饵初速度方向受载机上诱饵弹发射器的安装方位的直接影响, 考虑空气阻力和重力的作用, 红外诱饵运动轨迹实际是一条下落的曲线。

在大地坐标系下, 令载机位置在红外诱饵弹发射时的坐标为 (x_0, y_0, z_0) , 同时定义红外诱饵弹出膛后的

质量为 m , 重力加速度为 g , 发射速度 v_f 。假设红外诱饵发射器相对于载机的安装位置的中心点与载机坐标系的原点重合, 安装方位由偏航角 ψ_e 和俯仰角 θ_e 表示, 即确定初始发射速度方向。偏航角的定义为红外诱饵发射器安装的方向与机体纵向机头方向之间的夹角, 从载机尾部向头部看时红外诱饵发射器的偏航角逆时针方向为正。俯仰角的定义为红外诱饵发射器安装的方向与载机机体平面之间的夹角, 俯仰角与载体机头上仰的方向一致时为正, 如图 7 所示, θ_e 为正, ψ_e 为负。

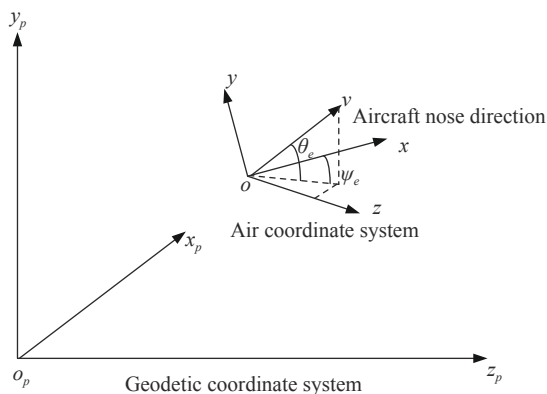


图 7 坐标示意图

Fig.7 Coordinate diagram

计算红外诱饵出膛后的运动轨迹, 具体过程如下: 首先计算红外诱饵在大地坐标系下的初速度 $(v_{x00}, v_{y00}, v_{z00})^T$, 令红外诱饵弹出膛时刻在机体坐标系里的初速度分量分别为 $(v_{x0}, v_{y0}, v_{z0})^T$, 即:

$$\begin{cases} v_{x0} = v_f \cos \theta_e \cos \psi_e \\ v_{y0} = v_f \sin \theta_e \\ v_{z0} = v_f \cos \theta_e \sin \psi_e \end{cases}$$

机体坐标系到准大地坐标系的转换矩阵 L_2 为:

$$L_2 = \begin{pmatrix} \cos \psi_p & 0 & \sin \psi_p \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \psi_p & 0 & \cos \psi_p \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta_p & -\sin \theta_p & 0 \\ \sin \theta_p & \cos \theta_p & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma_p & -\sin \gamma_p \\ 0 & \sin \gamma_p & \cos \gamma_p \end{pmatrix} =$$

$$\begin{pmatrix} \cos \theta_p \cos \psi_p & -\sin \theta_p \cos \psi_p \cos \gamma_p + \sin \psi_p \sin \gamma_p & \sin \theta_p \cos \psi_p \sin \gamma_p + \sin \psi_p \cos \gamma_p \\ \sin \theta_p & \cos \theta_p \cos \gamma_p & -\cos \theta_p \sin \gamma_p \\ -\cos \theta_p \sin \psi_p & \sin \theta_p \sin \psi_p \cos \gamma_p + \cos \psi_p \sin \gamma_p & -\sin \theta_p \sin \psi_p \sin \gamma_p + \cos \psi_p \cos \gamma_p \end{pmatrix}$$

偏航角: ψ_p , 俯仰角为 θ_p , 滚转角: γ_p

即

$$\begin{pmatrix} v_{x00} \\ v_{y00} \\ v_{z00} \end{pmatrix} = L_2 \begin{pmatrix} v_{x0} \\ v_{y0} \\ v_{z0} \end{pmatrix}$$

红外诱饵在出超后主要受阻力、重力等的影响, 文中主要考虑阻力和重力, 同时忽略风速对红外诱饵弹的影响。阻力是红外诱饵弹几何形状、速度、质量和大气密度的函数, 用 f 表示, 同时定义 α , 其为红外诱饵速度 v 在 xoz 平面的投影即:

$$f = m \frac{\rho g v^2}{2\beta}, \beta = \frac{m}{C_d A_{ref}}$$

$$\begin{cases} f_x = -\frac{C_d A_{ref} \rho g v^2}{2} \times \frac{\cos \alpha v_{x00}}{\sqrt{v_{x00}^2 + v_{z00}^2}} \\ f_y = -\frac{C_d A_{ref} \rho g v^2}{2} \times \frac{v_{y00}}{\sqrt{v_{x00}^2 + v_{y00}^2 + v_{z00}^2}} \\ f_z = -\frac{C_d A_{ref} \rho g v^2}{2} \times \frac{\cos \alpha v_{z00}}{\sqrt{v_{x00}^2 + v_{z00}^2}} \end{cases}$$

式中: C_d 为阻力系数, 与速度和几何体形状有关; v 为红外诱饵弹的瞬时速度; ρ 为大气密度; A_{ref} 为红外诱饵弹的迎风面积。

同时在大地坐标系下, 各个时刻红外诱饵在 x 轴、 y 轴、 z 轴方向上的速度分量 v_x, v_y, v_z 分别可以通过 $m \frac{dv_x}{dt} = f_x, m \frac{dv_y}{dt} = -mg + f_y, m \frac{dv_z}{dt} = f_z$ 计算得到。

即红外诱饵在大地坐标系下, 各个时刻的速度为 $(v_x, v_y, v_z)^T$ 。

在具体计算时, 红外诱饵运动轨迹时单步步长为 1 ms, 即在每个仿真步长可认为是匀速运动, 最后利用四阶龙格-库塔法^[13-14], 再与飞机的位置坐标合

成, 即可近似的计算出任意时刻 t , 红外诱饵在大地坐标系里的位置坐标 $(x, y, z)^T$ 。

基于上述干扰轨迹生成理论, 某飞机机动情况下干扰投放运动轨迹模拟如图 8 所示。

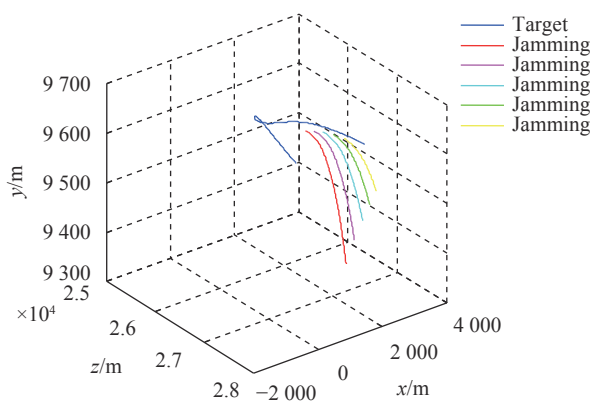


图 8 某飞机机动下单发干扰投放运动模拟

Fig.8 Motion simulation of single launch jamming in aircraft maneuvering

3 双色半实物仿真模拟效果

基于上述双色目标和干扰建模过程, 使用某中长双色产品采集仿真图像验证效果, 中长波产品, 中波探测波段为 3~5 μm , 图像分辨率为 320×256; 长波探测波段为 8~12 μm , 图像分辨率为 320×256。分别从远距侧向以及近距尾后干扰投放验证双色仿真效果, 具体如图 9、图 10 所示。

如图 9、图 10 所示, 远距情况下中长波战机机身对比较为明显, 而到末端战机本身以外, 红外诱饵燃烧尺寸特征区别也大, 而中长红外成像特征的差异有助于在复杂对抗场景下识别目标。

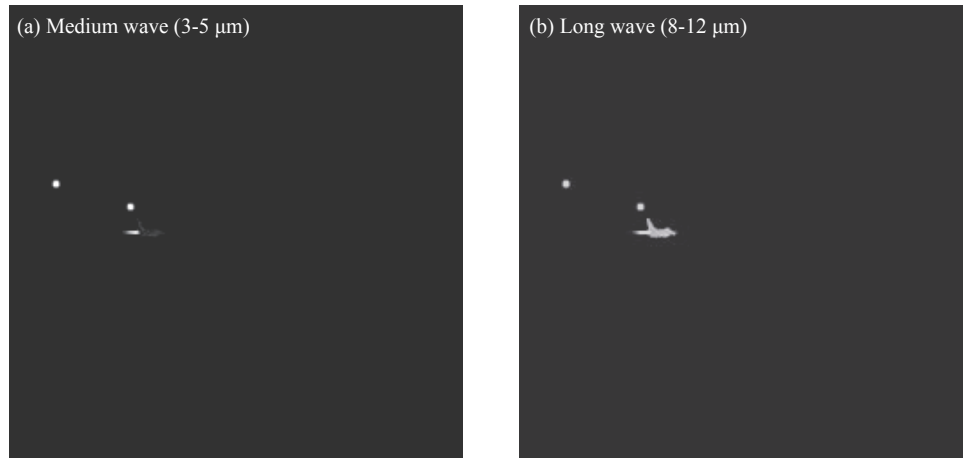


图 9 中长波某战机远距侧向干扰投放仿真

Fig.9 Medium wave and long wave simulation of long range lateral jamming launch for aircraft

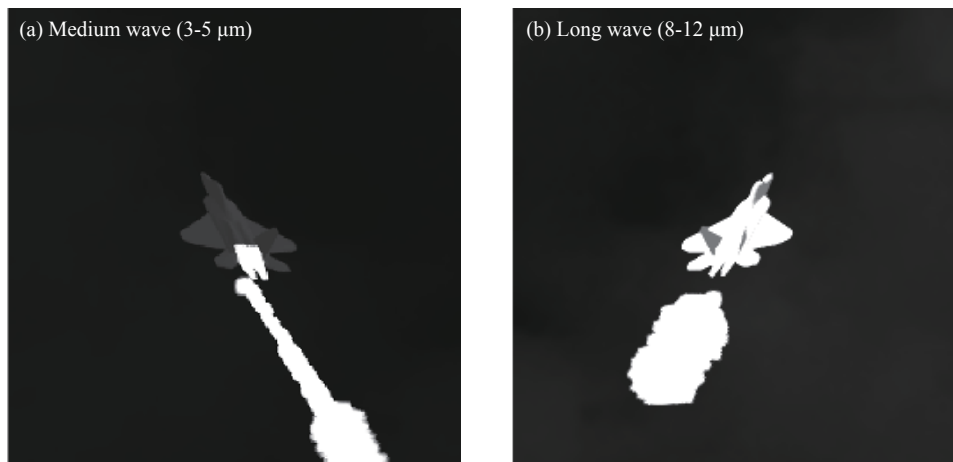


图 10 中长波某战机近距尾后干扰投放仿真

Fig.10 Medium wave and long wave simulation of short range tail jamming launch for aircraft

4 结 论

文中重点介绍了基于 MOS 电阻阵以及 DMD 场景模拟系统组成的中长波双色半实物仿真系统,在此基础上开展中长双色典型地物目标、空中目标及其红外诱饵的建模仿真。在抗干扰半实物仿真考核中,目标在不同机动方式、不同投放角度及速度下投放红外诱饵后,其运动轨迹的逼真度直接影响抗干扰评估结果,为此在红外诱饵运动模型建立过程中,考虑投放角度、速度尤其机动方式对红外诱饵运动轨迹的影响,提高模型模拟置信度。最后通过中长波产品完成中长双色半实物仿真,验证中长波双色在实际对抗过程中的成像差异。

参考文献:

- [1] Zang Haifei, Liu Li, Tian Yi, et al. The realization forms and development for radio frequency/optics compound guidance [J]. *Flight Control & Detection*, 2020, 3(3): 16-23. (in Chinese)
- [2] Zhang Zuoyu, Liao Shouyi, Zhang Jincheng, et al. Real-time battlefield smoke IR simulation based on physical model [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(4): 0404004. (in Chinese)
- [3] Li Jianxun, Tong Zhongxiang, Fan Xiaoguang, et al. Research of an effectiveness evaluation method of infrared countermeasure process [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(3): 0304008. (in Chinese)
- [4] Dong Minzhuo, Wang Jianhua, Sun Li, et al. IR target simulation and generation system based on MOS resistor array

- [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(3): 411-415. (in Chinese)
- [5] Yang Songqi, Wang Bingjian, Yi Xiang, et al. Infrared decoys recognition method based on dual-band information fusion [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2014, 67: 542-546.
- [6] Bai Kun, Wang Yuehuan, Yan Yi, et al. Infrared small target tracking based on target and interference behaviors model [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2014, 67: 256-265.
- [7] Yang Chunling, Chen Yu, Yang Mengda. Research on infrared decoy movement characteristics and simulation[C]//7th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, 2012: 1892-1895.
- [8] Dong Minzhou, Wu Zhihong, Yan Jie. Visual simulation infrared images generation of the target, background and interference flare [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2005, 25(3): 567-569. (in Chinese)
- [9] Zhang Kai, Huang Yong, Sun Li, et al. Non-uniformity characterization and correction of MOS resistor array [J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2007, 25(1): 108-112. (in Chinese)
- [10] Stockbridge R G, Goldsmith G C. Characterization and nonuniformity correction of a resistor array infrared scene projector[C]//SPIE Proceedings, 1994, 2223: 51-62.
- [11] Yang Dong, Gao Deliang, Cao Yaoxin, et al. Study on anti-jamming technology of IR seeker [J]. *Flight Control & Detection*, 2020, 3(3): 80-85. (in Chinese)
- [12] Tang Shanjun, Song Minmin, Wang Biyun, et al. Infrared scene generation technology based on Hardware-in-the-loop simulation of MOS resistance arrays [J]. *Journal of System Simulation*, 2018, 30(4): 1319-1327. (in Chinese)
- [13] Lu Xiang, Yuan Yunbin, Jiang Zhenwei. Research on GLONASS orbit simulation based on Runge-Kutta method [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2014, 34(3): 137-141. (in Chinese)
- [14] Zhang Chunhui, Wu Jiantong, He Kunpeng, et al. Attitude algorithm of strapdown inertial navigation system 4_order Runge_Kutta [J]. *Applied Science and Technology*, 2005, 32(6): 37-39. (in Chinese)