

文章编号:1002-2082(2012)01-0197-06

定向红外对抗系统的激光源模拟研究

田晓飞,马丽华,赵尚弘,董毅,蒙文

(空军工程大学 电讯工程学院,陕西 西安 710077)

摘 要:针对半实物仿真中定向红外对抗系统的有效模拟问题,在分析定向红外对抗激光源技术的基础上,依据实战应用,计算得到 $3\text{ }\mu\text{m}\sim 5\text{ }\mu\text{m}$ 波段定向红外对抗激光源的辐射能量为飞机红外辐射强度绝对值的8倍,结合波长 $4\text{ }\mu\text{m}$ 处简化的大气传输透过率随传输距离的变化,推导出实战应用中红外导引头上辐射照度随飞机导弹之间距离的变化规律。设计半实物仿真中定向红外对抗的模拟方案,依据逼真模拟的原则,计算得到模拟激光源能量随飞机导弹之间距离和飞机辐射强度的变化规律,据此将飞机导弹相互距离1 km时刻的红外干扰源辐射能量设置为波长 $4\text{ }\mu\text{m}$ 模拟激光源能量,其他距离的模拟能量通过衰减片来控制。为提高定向红外对抗模拟的通用性和智能性,设计了模拟激光源的闭环控制方案。

关键词:定向红外对抗;激光源;闭环技术;模拟

中图分类号:TN219

文献标志码:A

doi:10.5768/JAO201233.0107002

Laser simulation of DIRCM system

TIAN Xiao-fei, MA Li-hua, ZHAO Shang-hong, DONG Yi, MENG Wen

(Telecommunication Engineering Institute, AFEU, Xi'an 710077, China)

Abstract: Aiming at the effective simulation of the DIRCM in the hardware-in-the-loop simulation, the calculated radiation energy for the laser source is 8 times of the absolute value of the aircraft radiation intensity in the band range of $3\text{ }\mu\text{m}\sim 5\text{ }\mu\text{m}$ based on the analysis of the laser source in DIRCM and real battlefield scenario. Combined with the change of atmospheric transmission transmittance in $4\text{ }\mu\text{m}$, the change rule of radiance on the IR seeker is obtained with the change of distance between the aircraft and the missile. The simulation scheme of DIRCM in the hardware-in-the-loop simulation is designed based on the principle of realistic simulation, the energy change of the laser source is calculated with the change of distance between the aircraft and the missile, the energy of IR interference radiation energy in 1 km is set as the energy of the simulation laser source, and the energies in other distances are controlled through the attenuation slice. At last, for the purpose of improving the versatility and intelligence in DIRCM simulation, the closed loop control of simulation laser is designed, and the method of closed loop control for interference wavelength and modulation mode is studied.

Key words: DIRCM; laser source; closed loop technology; simulation

引言

第三代、第四代红外空空制导导弹的广泛应用,使传统的红外诱饵、红外干扰机以及红外烟幕

干扰效能下降,必须发展新型的红外对抗手段,为空中平台提供有效的安全防护。定向红外对抗系统由于光束发散角小、能量集中、作用距离远,能

收稿日期:2011-06-01; 修回日期:2011-06-17

作者简介:田晓飞(1987—),男,河南舞钢人,硕士生,主要从事光电对抗与红外制导半实物仿真工作。

E-mail: tianxiaofei2011@163.com

够有效干扰新型红外制导导弹,因而被西方军事发达国家迅速发展和装备。特别是半导体泵浦固体激光器和非线性波长转换器的出现,促进了激光源定向红外对抗系统的实战应用。

为了在半实物仿真中逼真模拟实战干扰对抗环境,有效检验新型红外导引头作战性能,必然要求红外干扰模拟技术向前发展,进行定向红外对抗模拟研究。而激光源作为定向红外对抗系统的核心,是模拟研究的重点。本文以实战中定向红外对抗系统的技术应用为基础,研究了半实物仿真中定向红外对抗激光源的模拟技术,为整个定向红外对抗系统的模拟打下了基础。

1 DIRCM 激光源技术分析

1.1 辐射波长

只有在红外导引头工作波段内的干扰辐射才能产生有效的干扰效果^[1],因此要实现定向红外对抗系统对新型红外导引头的对抗,必须满足DIRCM激光源辐射波长与红外导引头工作波段相一致。此外,新型红外制导导弹探测器的工作波段逐渐向中红外($3\text{ }\mu\text{m}\sim 5\text{ }\mu\text{m}$)和远红外($8\text{ }\mu\text{m}\sim 12\text{ }\mu\text{m}$)发展,必须发展相对应的中红外、远红外激光源。

1.2 辐射能量

定向红外对抗系统的干扰效果很大程度上依赖于红外干扰激光束在导引头平面上的辐射照度大小^[2],因此红外激光源必须具有合适的辐射能量,一般要求定向红外干扰信号与红外目标信号的比值(J/S)大于1000。

1.3 发散角度

激光束($3\text{ }\mu\text{m}\sim 5\text{ }\mu\text{m}$ 波段)首先要满足在一定作战距离上,在跟踪导弹尾焰的导引装置引导下能够辐射到红外导引头上,同时在中红外波段激光辐射源的效率很低,为保持输入功率在一个有效的作战值上,必须缩小激光投射的立体角^[3],因此设置一个合适的激光束发散角非常重要。

1.4 干扰调制

红外导引头一般都采用滤波器设计,因此干扰能量要采用合适的调试方式,保持其变化规律与导引头滤波器的调制规律相一致,使定向红外干扰能够进入红外探测器,进而对红外目标形成有效干扰。

1.5 技术发展

为了对抗各种类型的红外导引头,定向红外对抗系统趋向于采用大功率、多波段红外辐射源,并且使用闭环工作方式,根据红外导引头的类型,选择合适的干扰激光波长以及有效的干扰调制来实施针对性的干扰,达到更好的对抗效果。

2 模拟能量计算

定向红外对抗激光源发出特定波段经过特殊调制的激光束,在高精度红外跟踪装置的引导下,经过大气传输到达红外导引头,此时红外导引头上的辐射照度直接决定着定向红外干扰的效果。假设激光源的辐射波长处在红外导引头的工作波段内,调制方式是针对红外导引头类型选定的,下面进行定向红外对抗辐射能量分析,并研究半实物仿真中基于相对等效原理的能量模拟。

2.1 DIRCM 激光源的辐射能量计算

定向红外对抗系统采用精密跟踪红外传感器实现对来袭导弹的成像以及跟踪,其探测距离可以达到10 km,跟踪精度达到mrad,在高分辨率成像以及高精度跟踪的基础上,干扰机锁定来袭导弹,发射红外干扰激光,使之保持照射在红外导引头上实现干扰。

如果初始干扰距离取为3 km,在干扰过程中,激光发散角固定,并且假设在飞机导弹相距1 km时能够满足红外激光刚好把锁定的整个导弹包含在照射区域内,那么激光源发散角为

$$\sigma = 2\arctan \frac{l\sin\theta}{2L} \quad (1)$$

式中:弹长 l 取为2.92 m;视线角 θ 取为 30° ;干扰作用距离 L 取1 km。可计算得发散角 σ 为1.5 mrad,考虑定向红外对抗系统红外传感器跟踪精度的影响,据参考文献[4]:激光源发散角 σ 设置为1 mrad $\sim$ 2 mrad比较恰当,因此本文设置激光源发散角 σ 为2 mrad。

在定向红外干扰应用中,不论干扰对象是调制盘导引头还是红外成像导引头,一般要求干扰信号比(J/S)大于30 dB^[5]:

$$10\lg \frac{J}{S} > 30$$
$$\text{即 } \frac{J}{S} > 1\,000 \quad (2)$$

则可计算激光源的辐射能量为

$$P_i = \int I_j d\Omega = \int_{I_S} I_S d\Omega = \frac{I_j}{I_S} I_S \Omega = \frac{J}{S} I_S \Omega \quad (3)$$

以 $3 \mu\text{m} \sim 5 \mu\text{m}$ 波段范围为参考,飞机红外信号的辐射强度依据使用推进剂、发动机的布局以及观察角度的不同,一般认为处在 $10 \text{ W/sr} \sim 1000 \text{ W/sr}$ 范围内^[6]。因此,当取 J/S 为 2 000 时,计算可得 $P_i = 8 |I_S| \text{ mW}$ 。

2.2 激光大气传输透过率计算

定向红外对抗系统辐射出的红外激光在大气传输过程中,会受到大气分子以及悬浮微粒对光束的吸收和散射,导致光束能量衰减。大气传输透过率计算如下。

2.2.1 散射透过率计算

依据能见度计算散射单独造成的透射率为

$$\tau_s(\lambda) = \exp\left[-\frac{3.912}{V}\left(\frac{\lambda}{0.55}\right)^{-q} \times L\right] \quad (4)$$

式中: V 为能见度,假设为晴朗天气、中等能见度, $V=10 \text{ km}$; L 为干扰激光传输距离; q 是与波长相关的常数,中等能见度时取 1.3;波长范围 $3 \mu\text{m} \sim 5 \mu\text{m}$, λ 取中心波长 $4 \mu\text{m}$ 求平均透射率。则可计算得平均散射透过率为 $\tau_s(4) = \exp(-2.965 \times 10^{-5} \times L)$ 。

2.2.2 水蒸气和二氧化碳的吸收透过率计算

设传输大气相对湿度为 $RH=40\%$, 温度为 285 K, 即 12°C , 对应的饱和水蒸气密度 $\rho_s=10.57 \text{ g/m}^3$, 可求绝对湿度为

$$\rho_w = \rho_s RH = 10.57 \times 40\% \approx 4.23 \text{ g/m}^3 \quad (5)$$

因此取中间距离 $L=2 \text{ km}$, 计算平均可凝结水的毫米数为

$$W = \rho_w X = 8.46 \quad (6)$$

依据海平面上水平路程水蒸气的光谱透过率统计^[7], 在中心波长 $4 \mu\text{m}$ 处, 红外激光的水蒸气透过率为 $\tau_{\text{H}_2\text{O}}(4)=0.970$ 。

同样依据海平面上水平路程二氧化碳的单体透过率统计^[7], 在中心波长 $4 \mu\text{m}$ 处, 红外激光的水蒸气透过率为 $\tau_{\text{CO}_2}(4)=0.991$ 。

2.2.3 综合透过率计算

在地表附近的几千米大气中, 吸收和散射是同时存在的, 因此大气的吸收和散射所导致的衰减都遵循比尔-郎伯定律, 因此大气总的透过率可表示为

$$\tau(\lambda) = \tau_a(\lambda) \tau_s(\lambda) = \tau_{\text{H}_2\text{O}}(\lambda) \tau_{\text{CO}_2}(\lambda) \tau_s(\lambda) \quad (7)$$

取红外激光中心波长为 $4 \mu\text{m}$, 则对应大气透过率为

$$\begin{aligned} \tau(4) &= \tau_{\text{H}_2\text{O}}(4) \tau_{\text{CO}_2}(4) \tau_s(4) \\ &= 0.970 \times 0.991 \times \exp(-2.965 \times 10^{-5} \times L) \\ &= 0.961 \times \exp(-2.965 \times 10^{-5} \times L) \end{aligned} \quad (8)$$

2.3 导引头辐射照度计算

定向红外对抗系统红外激光源的发射孔径可以达到 80 mm , 为简化计算, 假设导引头平面上辐射能量均匀分布, 可求得导引头平面上的辐射能量为

$$P_s = P_i \tau(\lambda) \frac{\pi\left(\frac{d}{2}\right)^2 \cos\theta}{\pi\left(L \tan \frac{\sigma}{2}\right)^2} \quad (9)$$

则导引头平面上的平均辐射照度为

$$\begin{aligned} E_s &= \frac{P_s}{\pi\left(\frac{d}{2}\right)^2} = P_i \tau(\lambda) \frac{\cos\theta}{\pi\left(L \tan \frac{\sigma}{2}\right)^2} = \\ &= \frac{P_i \tau(\lambda) \cos\theta}{\pi L^2 \tan^2 \frac{\sigma}{2}} \end{aligned} \quad (10)$$

取 λ 为 $4 \mu\text{m}$, θ 为 30° , 可得:

$$\begin{aligned} E_s &= \frac{P_i \tau(4) \cos(\pi/6)}{\pi L^2 \tan^2 \frac{\sigma}{2}} = (6.658 \times 10^6 \times \\ &|I_S| \exp(-2.965 \times 10^{-5} \times L) / \pi L^2 \end{aligned} \quad (11)$$

在干扰过程中, 随着飞机导弹相互距离 L 的变化, 导引头上的辐射照度变化如图 1 所示。

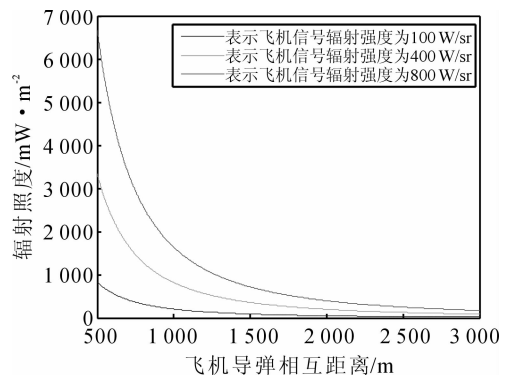


图 1 导引头辐射照度变化

Fig. 1 The changing of radiation intensity of illumination on the seeker

2.4 模拟激光源能量计算

半实物仿真中定向红外对抗系统的模拟采用红外干扰模拟发射器独立设计, 然后注入到已有红外目标背景模拟器的方案中, 红外干扰模拟发

射器系统如图 2 所示。

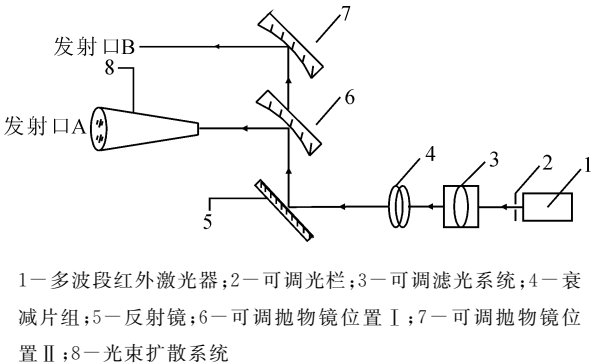


图 2 红外干扰模拟发射器光学系统原理

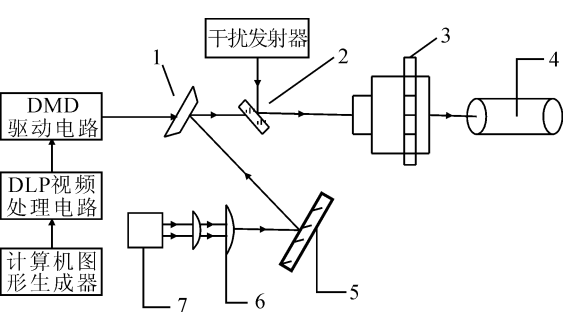
Fig. 2 The optical system theory of IR jamming simulate emitter

要模拟定向红外对抗系统被动红外跟踪和定向红外干扰情况下的对抗场景,采用红外干扰模拟发射器系统的发射口 A 产生扩束的激光束,照射到红外导引头上。因此,激光束经过光路衰减从发射口 A 辐射出时的能量为

$$P_1 = \tau_1 \tau_2 \tau_3 \rho_1 \rho_2 P_L \tag{12}$$

式中: P_L 为红外光源辐射能量; τ_1 、 τ_2 、 τ_3 分别为可调光栏、可调滤光片和衰减片组的能量透过率; ρ_1 、 ρ_2 为反射镜和位置可调抛物面镜的反射率。

从发射口 A 辐射出的激光能量,注入到基于 DMD 的微光阵列投影系统(MAPS)^[8] 的红外景象生成目标模拟器中,注入方案如图 3 所示。



1-DMD;2-可调半透半反射镜;3-准直光学系统;
4-导引头;5-反射镜;6-中继光学系统;7-黑体辐射源

图 3 红外景象生成目标模拟器的干扰注入原理

Fig. 3 The jamming injection theory of IR scene generating target simulator

则经过注入光学系统的衰减到达红外导引头平面的能量为

$$P_2 = P_1 \bar{\omega}_1 \bar{\omega}_2 \tag{13}$$

式中 $\bar{\omega}_1$ 、 $\bar{\omega}_2$ 分别为红外景象生成目标模拟器可调半透半反射镜的反射率和准直光学系统的能量透

过率。

设半实物仿真中红外导引头的孔径 d ,则可求得该导引头平面在实战中能够接收到的定向红外干扰能量为

$$P_s = E_s \pi \left(\frac{d}{2}\right)^2 \tag{14}$$

为了提高半实物仿真中干扰环境模拟的可信度和逼真度,必须以实战中导引头上干扰辐射能量为参考,转化到半实物仿真中,假设模拟激光源的发射光束对准红外导引头,并且光束全部集中在红外导引头接收范围内,因此有 $P_2 = P_s$,即

$$\tau_1 \tau_2 \tau_3 \rho_1 \rho_2 \bar{\omega}_1 \bar{\omega}_2 P_L = E_s \pi \left(\frac{d}{2}\right)^2 \tag{15}$$
$$\text{则 } P_L = \frac{\pi E_s d^2}{4 \tau_1 \tau_2 \tau_3 \rho_1 \rho_2 \bar{\omega}_1 \bar{\omega}_2}$$

本文中假设被检验红外导引头的孔径 $d=10$ cm,可调光栏和可调滤光片的能量透过率 τ_1 、 τ_2 分别取 0.8、0.5,衰减片组的能量透过率 τ_3 先取为 1,反射镜和位置可调抛物面镜的反射率 ρ_1 、 ρ_2 分别取 0.9、0.9,可调半透半反射镜的反射率和准直光学系统的能量透过率 $\bar{\omega}_1$ 、 $\bar{\omega}_2$ 分别取 0.5、0.9,则可计算得 $P_L = \frac{5\pi E_s}{1\,166.4}$ mW,代入(11)式可得随飞机导弹距离 L 的变化,如图 4 所示。

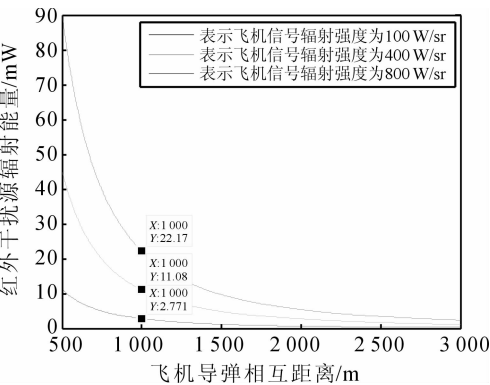


图 4 红外干扰辐射能量变化

Fig. 4 The changing of IR jamming radiation energy

因此要给波长 $4\,\mu\text{m}$ 的模拟激光源设置出射能量,应该参照半实物仿真中飞机信号辐射信号强度模拟量的大小,将飞机导弹相互距离 1 km 时刻的红外干扰源辐射能量设置为激光源能量,然后通过上文计算中设置为 1 的衰减片组的能量透过率来调节 1 km~3 km 距离上的干扰能量变化,而在 1 km 距离之内将衰减片组的能量透过率均设置为 1。

3 闭环控制模拟设计

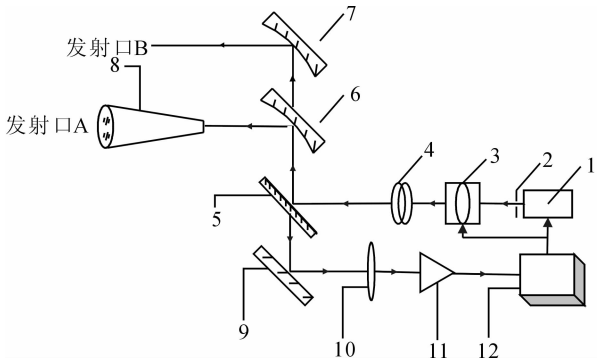
要实现时半实物仿真中红外导引头更加逼真、有效的干扰,定向红外对抗系统不仅要设置合适的激光源干扰能量,而且需要采用带有反馈环节的闭环设计,完成对红外导引头工作波段以及干扰模式的有效判断,从而提高干扰模拟的通用性和智能性,下面对定向红外对抗系统激光源的闭环控制进行模拟设计。

3.1 闭环技术

闭环定向红外对抗系统是通过向锁定的来袭导弹发射低能多波段激光探测信号,对激光回波进行分析,从而判断来袭导引头的相关信息,进行干扰激光的闭环控制^[9]。其关键是用来识别导弹类型的激光干扰能量能否从导弹导引头上反射回来以及回波分析算法是否快速、高效。

3.2 模拟方法与设计

改进原有红外干扰模拟发射器系统(图 2),如图 4 所示。把 5 改为分光镜,加入反射镜 9、传感器 10、放大器 11 和控制处理机 12 实现闭环控制。



1、2、3、4、6、7、8 同图 2;5—分光镜;9—反射镜;10—传感器;11—放大器;12—控制处理机

图 5 闭环红外干扰模拟发射器光学系统原理
Fig. 5 The optical system theory of closed loop IR jamming simulate emitter

3.2.1 对准

对准校验途径。多波段红外激光源预发射一低能量的激光束,通过模拟发射器光路和注入光路投向红外导引头。如果能够从导引头探测器检测出红外信号,则表明激光束已经照射到导引头上,如果同时红外干扰模拟发射器光学系统回波光路中的传感器也能检测到红外激光信号,则认为激光光路已经对准。

3.2.2 识别判断

通过猫眼效应分析可知,入射到红外导引头

上的激光,首先经过导引头光学系统的会聚和滤波,到达探测器面阵,再经过吸收和反射沿入射光路返回形成回波,并且最终获得的回波主要为导引头工作波段内的激光信息,其余波段信息很少被反射回来。建立表 1 所示的数据库,采用基于图像频率的快速匹配算法进行导引头类型判断,基本思想为:对输入的导引头回波信息图像进行频域变换,与数据库中的模板图像频域信息进行比较,取相差最小的模板,其对应的导引头类型即判断为被测红外导引头类型。

表 1 导引头信息数据库
Table1 The data-base of the seeker information

导引头工作波段/ μm	具体型号	回波信息图像	工作频率	干扰调制
1~3	I	(一)	a	1
	II	(二)	a	2
3~5	III	(三)	c	3
	IV	(四)	d	4
8~12	V	(五)	e	5
	VI	(六)	f	6

3.2.4 激光源控制

根据匹配算法计算出的匹配红外导引头类型,调用表 1 所示的导引头信息数据库,获取相应的导引头工作波段、频率以及对应的干扰调制信息,进而控制可调谐多波段红外激光器进行有针对性的内部干扰调制,并且控制可调滤光系统来进行工作波段选择,实现闭环干扰。

4 结束语

定向红外对抗系统能够在大型飞机以及武装直升机的光电防护中发挥重大作用,并将随着先进的多波段、高能量激光源技术的发展而取得更加广泛的应用,因此必须在半实物仿真中开展定向红外对抗模拟研究。本文以实战中定向红外对抗系统的应用分析为依据,结合半实物仿真相关设计,计算了不同飞机辐射强度下激光源模拟所需要的能量,为具体的能量设置提供参考,并且给出了模拟激光源闭环控制设计方案,有利于干扰模拟的通用性和智能性。

参考文献:

[1] Bernhard Molocher. Countermeasure laser development[J]. SPIE, 2005, 5989: 598902.
[2] 车进喜,王东,张恒伟,等. 激光参数对红外成像系统

- 干扰效果影响的实验研究[J]. 应用光学, 2011, 32(5):992-996.
- CHE Jin-xi, WANG Dong, ZHANG Heng-wei, et al. Influence of laser parameters on jamming effectiveness of IR imaging system[J]. Journal of Applied Optics, 2011, 32(5): 992-996. (in Chinese with an English abstract)
- [3] 付伟. 定向红外对抗技术的发展现状[J]. 航空电子技术, 2000 (3): 64-69.
- FU Wei. The development of DIRCM[J]. Avionics Technology, 2000 (3): 64-69. (in Chinese with an English abstract)
- [4] HECHT J . Solid-state high-energy laser weapons[J]. Optics & Photonics News, 2003,1:42-47.
- [5] BEKMAN H H P T, HEUVEL J C, PUTTEN F J M, et al. Development of a mid-infrared laser for study of infrared countermeasures techniques [J]. SPIE, 2004,5615:578214.
- [6] HAELLSTIG E, STIGWALL J, LINDGREN M, et al. Laser beam steering and tracking using a liquid crystal spatial light modulator [J]. SPIE, 2003, 5087:486892.
- [7] 张建奇, 方小平. 红外物理[M]. 西安: 电子科技大学出版社, 2004.
- ZHANG Jian-qi, FANG Xiao-ping. Infrared physics [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2004. (in Chinese)
- [8] 刘兴堂. 精确制导、控制与仿真技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- LIU Xing-tang. Precise guidance, control and simulation technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006. (in Chinese)
- [9] 徐大伟. 定向红外干扰技术的发展分析[J]. 红外与激光工程, 2008(6):695-698.
- XU Da-wei. Development analysis of the IR decoy anti-jamming technology[J]. Infrared and Laser Engineering, 2008(6):695-698. (in Chinese with an English abstract)