

文章编号:1001-5078(2023)09-1405-05

· 光电对抗 ·

红外搜索系统步进扫描模式下搜索能力研究

张启鹏, 夏 斌, 冯 亮

(中国人民解放军 63893 部队, 河南 洛阳 471000)

摘 要: 步进扫描是红外搜索系统实现大俯仰空间搜索的一种方式, 用于探测较大高度范围内来袭目标。由于步进过程中俯仰基线需要不断调整, 致使俯仰搜索范围与目标高度的重合存在一定偶然性, 其搜索能力很难通过外场试验的方式进行评估。针对采用步进扫描方式的红外搜索系统, 分析了目标与搜索系统瞬时视场相遇的规律, 以目标与固定基线下红外搜索系统瞬时视场的相遇概率模型为基础, 进一步给出了红外搜索系统步进扫描模式下的相遇概率模型, 以某红外搜索系统为例, 利用该模型对比了两种步进扫描模式的搜索效果, 分析了步进扫描模式下不同搜索空域范围对作用距离及相应相遇概率的影响, 为评估该类型红外搜索系统的搜索能力和最大程度发挥其能力提供了可以参考的方法。

关键词: 红外搜索; 步进扫描; 相遇概率; 作用距离

中图分类号: TN971. *5; TN219 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2023.09.016

Research on the search capability of infrared searching system in step scanning mode

ZHANG Qi-peng, XIA Bin, FENG Liang

(No. 63893 Unit of PLA, Luoyang 471000, China)

Abstract: Step scan is a way to realize large pitch region search in infrared search system, which is used to detect incoming targets in a large altitude range. As the pitch baseline needs to be constantly adjusted during the stepping process, the overlap between the pitch search range and the target altitude is accidental, and its search ability is difficult to be evaluated by field tests. Aiming at the infrared search system adopting step-by-step scanning mode, the law that the target meets the instantaneous visual field of the search system is analyzed in this paper. Based on the encounter probability model of the target and the instantaneous field of view of the infrared search system with a fixed baseline, the encounter probability model of the infrared search system under step-by-step scanning mode is further given. Taking an infrared search system as an example, the mode is used to compare the search effects of two step-by-step scanning modes and to analyze the influence of different search airspace ranges on the operating distance and corresponding encounter probability under step-by-step scanning mode, providing a reference method that can be used to evaluate the search ability of this type of infrared search system and to maximize its performance.

Keywords: IR searching; step scanning; encounter probability; operating range

1 引 言

红外搜索系统是光电对抗的关键装备之一, 通常用来承担对空中目标进行侦察告警, 为后续

的作战行动提供目标引导信息。随着技术的不断进步, 已经发展到第三代的红外搜索系统, 出现了利用多个大规格焦平面阵列的凝视传感器构建的

作者简介: 张启鹏(1982-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事光电对抗装备试验及训练评估方面的研究。E-mail: zhang0925@163.com

收稿日期: 2022-11-13

分布式红外搜索系统,也有第三代红外搜索系统使用焦平面阵列,通过旋转扫描方式实现水平方向 360° 的全景覆盖的。但现阶段比较成熟且已装备的大多是第二代的红外搜索系统,采用长线列、超长线列的焦平面阵列,通过光机扫描实现水平方向 360° 的全景覆盖。^[1-5]

对于这种水平方向 360° 扫描的红外搜索系统来说,其俯仰方向瞬时视场一般都不大,无法直接覆盖大的俯仰范围,一般可以通过螺旋式或步进式来覆盖。由于步进扫描的原因,瞬时视场的俯仰角一直在变化,红外搜索系统的瞬时视场与目标的相遇具有一定的随机性,其探测概率与固定基线下的探测概率明显不同,也较难通过有限的外场试验方式获得,目前在研究其告警能力涉及到探测概率时,多是从信噪比角度出发,而对物理空间相遇的概率的关注较少^[6-12],也有部分文献对固定基线下空间相遇的概率进行了研究^[13-14]。

本文主要针对采用步进扫描的红外搜索系统,建立了步进扫描模式下红外搜索系统的相遇概率模型,并举例分析了不同步进扫描方式下红外搜索系统的搜索能力,为评估该类型红外搜索系统的搜索能力和最大程度发挥其能力提供了可以参考的方法。

2 红外搜索视场目标相遇模型

2.1 目标与搜索视场范围的位置关系

假设搜索瞬时视场的上下仰角分别为 α, β , 作用距离为 R 。对于红外搜索设备来说其瞬时搜索范围可以表示为一个半径为作用距离,夹角为瞬时视场角的扇形区域,以装备位置为原点,则在方位 360° 周扫的情况下,整个有效搜索空域呈漏斗状,如图 1 所示。

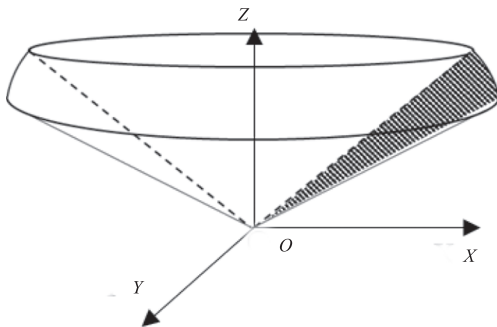


图 1 红外搜索系统搜索空域示意图

Fig. 1 The search region of infrared search system

假设目标高度为 h , 航捷为 y , 速度为 v , 航向沿 X 轴负方向。在不考虑相遇概率的条件下目标航迹与搜索空间交汇范围如图 2 所示。

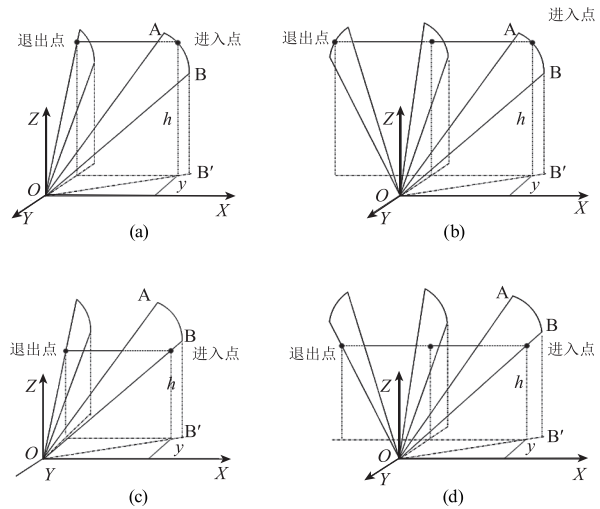


图 2 目标与搜索空域相遇点示意图

Fig. 2 Range of target encounter with search region

其中,扇型区域 AOB 为瞬时搜索范围, $\angle AOB$ 为瞬时视场角, $\angle AOB' = \alpha$, $\angle BOB' = \beta$ 。图 2(a)、(b) 为进入点在瞬时搜索范围的 AB 边时的情况,图 2(c)、(d) 为进入点在瞬时搜索范围 OB 边时的情况,图 2(a)、(c) 为退出点在 OA 边时的情况,图 2(b)、(d) 为退出点在瞬时搜索范围 AB 边时的情况。

2.2 周扫视场与目标相遇概率

装备位于原点,瞬时视场以角速度 ω 绕 Z 轴转动进行搜索,则扫描一周的时间为 $T = 2\pi/\omega$,对于搜索范围内一个相对与装备角速度为 0 的目标,搜索视场与目标相遇的概率密度为 $f(t) = \omega/2\pi$,当目标在该位置出现时间为 t_1 时刻至 t_2 时刻,该目标相遇概率即可表示为^[13-14]:

$$P = \int_{t_1}^{t_2} \frac{\omega}{2\pi} dt = \frac{\omega}{2\pi} (t_2 - t_1) \quad (1)$$

当 $t_2 - t_1$ 等于扫描周期 T 时,目标与瞬时搜索视场则必然相遇,此时相遇概率为 1。当目标进入时存在一定的航捷,因此目标相对 Z 轴的运动存在角速度分量 ω_z ,瞬时搜索视场相对与目标的角度为 $\omega + \omega_z$,则目标相遇概率可表示为:

$$P = \int_{t_1}^{t_2} \frac{(\omega + \omega_z)}{2\pi} dt \quad (2)$$

目标高度为 h ;航捷为 y ;速度为 v ;航向沿 X 轴负方向,则其相对 Z 轴运动的角速度分量 ω_z 可表示为:

$$\omega_z = \frac{v \cdot y}{x^2 + y^2} \quad (3)$$

目标在一个微小距离 dx 上驻留的时间为 $dt = dx/v$,则目标在搜索空域的相遇概率可表示为:

$$P = \int_{x_{in}}^{x_p} \frac{(\omega + \omega_{zt})}{2\pi \cdot v} dx$$

$$= \left(\frac{\omega}{2\pi v} + \arctan\left(\frac{x}{y}\right) \right) \Big|_{x=x_{in}}^{x=x_p} \quad (4)$$

其中, x 为目标在 X 轴上坐标; x_{in} 为目标进入搜索空域的起始位置; x_p 为相遇概率为 P 时目标的位置; x_{out} 为目标退出搜索空域时的位置。当 $P \leq 1$ 时, $x_p = x_{out}$ 。结合上小节进入点和退出点位置的分析, x_{in} 和 x_{out} 取值为:

$$x_{in} = \begin{cases} \sqrt{R^2 - h^2 - y^2} & \text{从 AB 段进入} \\ \sqrt{(h \cot \beta)^2 - y^2} & \text{从 OB 段进入} \end{cases} \quad (5)$$

$$x_{out} = \begin{cases} \sqrt{(h \cot \alpha)^2 - y^2} & \text{从 OA 段退出} \\ -\sqrt{(h \cot \beta)^2 - y^2} & \text{从 OB 段退出} \\ -\sqrt{R^2 - h^2 - y^2} & \text{从 AB 段退出} \end{cases} \quad (6)$$

如果从 x_{in} 沿着路径到 x_{out} 的积分结果大于 1, 则表示存在某一个位置 x_{p1} , 使目标从 x_{in} 运动到 x_{p1} 的过程中, 与瞬时搜索视场相遇的概率为 100%, 由于概率大于 1 没有统计意义, x_p 取值 x_{p1} 如即可。

需要指出的是, 如果从 x_{in} 沿着路径到 x_{out} 的积分结果满足 $n+1 > P > n$ (n 为整数), 存在 x_{p1} 、 x_{p2} 、 $\dots$ 、 x_{pn} 等多个位置, 使得积分结果分别为 1、2、 $\dots$ 、 n , 这一结果仅表示对多段连续路径上运动目标的连续相遇的情况, 即对 (x_{in}, x_{p1}) 、 (x_{p1}, x_{p2}) 、 $\dots$ 、 $(x_{p(n-1)}, x_{pn})$ 、 (x_{pn}, x_{out}) 等多段路径上的相遇概率分别为 $P_{(x_{in}, x_{p1})} = 1$ 、 $P_{(x_{p1}, x_{p2})} = 1$ 、 $\dots$ 、 $P_{(x_{p(n-1)}, x_{pn})} = 1$ 、 $P_{(x_{pn}, x_{out})} = p - n$, 则连续 $n+1$ 次相遇的概率为 $p - n$ 。通常对目标建立航迹至少需要三个点、对运动目标建立稳定航迹需要四个点, 这也就要求目标要与搜索瞬时视场连续多次相遇, 此时 x_p 可根据要求选择相应的位置作为积分的上限。

2.3 基线步进扫描时目标搜索相遇概率

当采用基线步进方式对更大空域进行搜索时, 通常会在单个基线下根据建立航迹的需要连续完成 L 周扫描后, 接着调整到下一个基线继续扫描 L 周, 各个扫描基线下的搜索空域紧紧相接, 拼接成一个大的告警空域。假设基线共调整 M 次后, 扫描完整个告警空域并回到起始基线, 此后不断重复这一过程对告警空域进行扫描。则目标出现时扫描基线处在第 m 次 ($m=1, 2, \dots, M$) 基线上的概率为 $1/M$, 此基线下, 在第 l 周 ($l=1, 2, \dots, L$) 上的概率为 $1/L$ 。对目标的相遇概率可表示为:

$$P_{ml} = \frac{1}{M} \frac{1}{L} \int_{x_{ml_in}}^{x_{p_ml}} \frac{(\omega + \omega_{zt})}{2\pi \cdot v} dx \quad (7)$$

目标在飞行过程中, 可能会穿越多个基线下的搜索空域, 则全搜索空域下对航捷为 y 、高为 h 、速度为 v 沿 $-X$ 轴方向进入的目标相遇概率为:

$$P(y, h, v) = \sum_{m=1}^M \sum_{l=1}^L \frac{1}{M} \frac{1}{L} \int_{x_{in_ml}}^{x_{stop_ml}} \frac{(\omega + \omega_{zt})}{2\pi \cdot v} dx \quad (8)$$

其中, x_{in_ml} 和 x_{stop_ml} 为对应基线下目标进入位置计算结束位置, 它们相互衔接, 总体组成了整个搜索空域的进入点 x_{in_z} 和退出点 x_{out_z} 。与单一基线下情况类似, 沿着整个搜索空域的进入点到退出点的路径积分, 存在一个位置 x_p 使得相遇概率为 P 。

3 分析举例

以文献中[15]提到的法国的“旺皮尔 MB”IRST 系统的参数为例, 方位扫描速度为 $720^\circ/\text{s}$, 垂直视场 5° , 仰角覆盖范围 $-20^\circ \sim 45^\circ$, 对飞机探测距离为 18 km。

如果该系统在俯仰 0° 基线为起点, 假设连续探测 3 次才判定告警, 每个基线上需要扫描 3 周, 接着基线按照步长 5° 增加的方式调整瞬时搜索视场, 至规定俯仰角度, 接着基线同样按照步长 5° 减小的方式逐渐减小回到 0° , 这种方式的基线变化情况如图 3 所示。

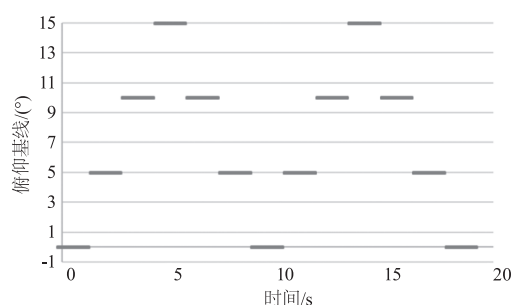


图3 基线调整方式一中俯仰基线随时间变化示意图

Fig. 3 Relationship between pitching baseline and time in baseline adjustment model1

按这种方式进行基线调整, 搜索范围为 10° 、 15° 、 20° 和 25° 条件下, 对航捷为 0、速度为 300 m/s 的不同高度进入的飞机的水平告警距离以及相遇概率如图 4、图 5 所示。

从图中可以看出, 通过调整基线的方式扩大搜索范围, 能够增加告警的高度, 但同时会减小告警距离; 告警高度要比根据最大仰角和作用距离计算的理论值要小; 同时对告警高度的增加并不是无限制的, 当搜索范围扩大太多时, 会使相遇概率严重下

降,实际能够告警的高度范围反而会减小。

结合图 3 可发现,当基线数量大于 2 个时,起始的基线和最高处基线在一个扫描周期中所占的比例中间基线的低,因此告警距离会较中间基线的告警距离低的很明显。

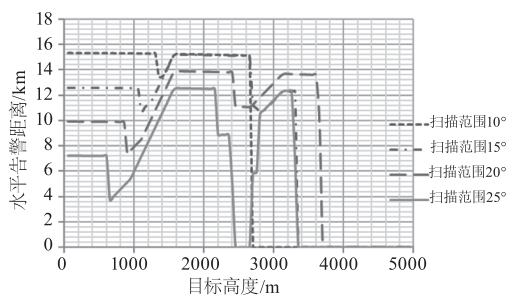


图 4 基线调整方式一时不同搜索范围的水平告警距离

Fig. 4 Relationship between horizontal alarm distance and search range in baseline adjustment model1

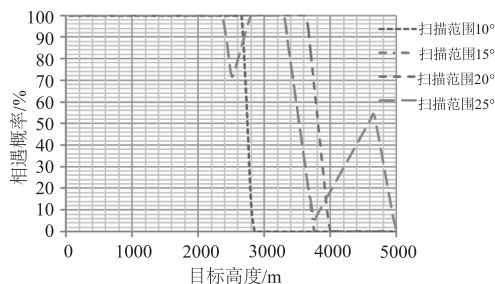


图 5 基线调整方式一时不同搜索范围的相遇概率

Fig. 5 Relationship between encounter probability and search range in baseline adjustment model1

基线还可以采用如图 6 所示的第二种调整方式,即基线达到最大后,直接回到起始位置,而不是逐渐调整,这样可以减小整个空间的搜索周期,同时可以使每个基线所占比例一致,使结果不易变化太大。

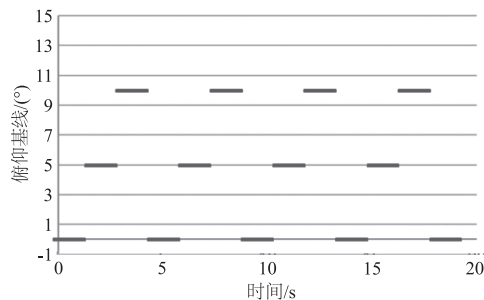


图 6 基线调整方式二中俯仰基线随时间变化示意图

Fig. 6 Relationship between pitching baseline and search range in baseline adjustment mode2

按这种方式进行基线调整,搜索范围为 10° 、 15° 、 20° 和 25° 条件下,对航捷为 0、速度为 300 m/s 的不同高度进入的飞机的水平告警距离以及相遇概率如图 7、图 8 所示。

与基线调整方式一相同,通过调整基线的方式扩大搜索范围,告警覆盖的高度不会随无限制增加,即使增加了,相遇概率也会有所下降。

经过计算结果的对比可以发现,基线调整方式二下搜索范围 15° 时的搜索效果要优于基线调整方式一下搜索范围 20° 时的搜索效果,两种基线调整方式下的水平告警距离对比效果如图 9 所示。

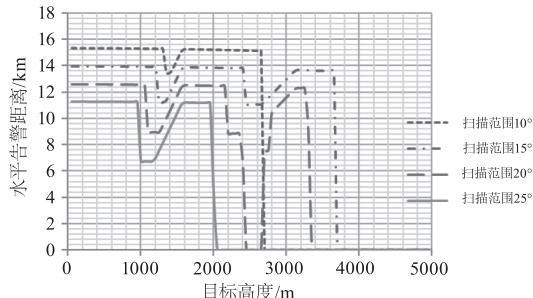


图 7 基线调整方式二时不同搜索范围的水平告警距离

Fig. 7 Relationship between horizontal alarm distance and search range in baseline adjustment mode 2

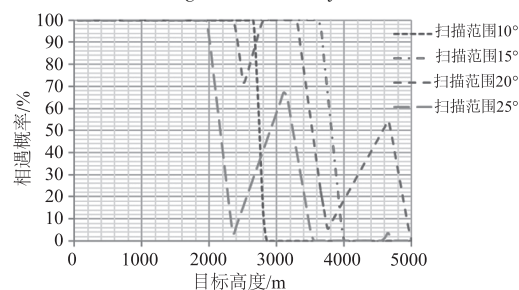


图 8 基线调整方式二时不同搜索范围的相遇概率

Fig. 8 Relationship between encounter probability and search range in baseline adjustment mode2

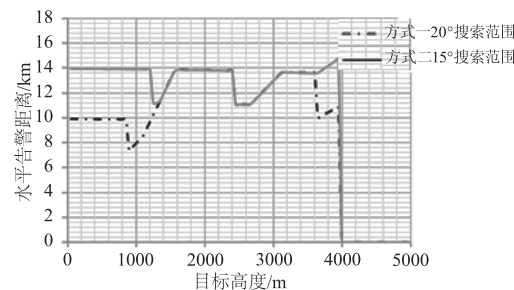


图 9 两种基线调整方式下的水平告警距离对比图

Fig. 9 Comparison of horizontal alarm distance between two baseline adjustment modes

4 结 语

采用步进扫描方式的红外搜索系统,在牺牲一定告警距离的前提下,可以相应的扩大一些对目标搜索的俯仰范围,并且不会造成相遇概率下降和丢失目标的情况出现,但是若俯仰搜索范围太大,则会严重影响告警效果。

本文针对采用步进扫描方式的红外搜索系统所提出的对空目标搜索相遇模型,可以用来分析基线动态调整下的红外搜索系统作用距离及相应相遇概率,可以作为相关装备搜索能力评估分析的方法,也可以用来优化现有装备的搜索范围以获得最大的告警范围。

参考文献:

- [1] Shi Yongshan, Zhang Zunwei. Development of infrared search and track system [J]. Electro-Optic Technology Application, 2016, 31(4): 11–14. (in Chinese)
石永山, 张尊伟. 红外搜索与跟踪系统发展综述[J]. 光电技术应用, 2016, 31(4): 11–14.
- [2] Chen Chaoshuai. Technical research and implementation on image motion compensation of infrared array search system by fast scan [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics, CAS, University of Chinese Academy of Sciences, 2018. (in Chinese)
陈超帅. 红外面阵搜索系统快速扫描成像像移补偿技术研究[D]. 上海: 中国科学院大学中国科学院上海技术物理研究所, 2018.
- [3] Yang Long. Research on key technologies for the infrared array search system [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics, CAS, University of Chinese Academy of Sciences, 2017. (in Chinese)
杨龙. 红外面阵搜索系统关键技术研究[D]. 上海: 中国科学院大学中国科学院上海技术物理研究所, 2017.
- [4] Ding Xuezhuan, Huang Jiangqing, Li Zheng, et al. Optic design of $6 \times$ continuous zoom scanning infrared system with array detector [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2021, 40(1): 89–95. (in Chinese)
丁学专, 黄姜卿, 李争, 等. 六倍连续变焦面阵扫描红外光学系统设计[J]. 红外与毫米波学报, 2021, 40(1): 89–95.
- [5] Ding Xuezhuan, Zhou Panwei, Wang Shiyong, et al. Optical design of two-stage zoom scanning infrared system with array detector [J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(8): 20200007. (in Chinese)
丁学专, 周潘伟, 王世勇, 等. 两档变焦面阵扫描红外光学系统设计[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(8): 20200007.
- [6] Jia Qinglian. Model for point-target detection of panoramic IR-searching system [J]. Journal of Changchun University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2015, 38(3): 6–10. (in Chinese)
贾庆莲. 周视红外搜索系统对空中目标的搜索模型[J]. 长春理工大学学报: 自然科学版, 2015, 38(3): 6–10.
- [7] Qi Meng, Jin Weiqi, Wang Chunyong. Detection probability of IR panoramic searching system [J]. Infrared Technology, 2003, 25(2): 19–23. (in Chinese)
祁蒙, 金伟其, 王春勇. 红外搜索跟踪系统的探测概率研究[J]. 红外技术, 2003, 25(2): 19–23.
- [8] Liu Zhongling, Yu Zhenhong, Li Liren, et al. Status and development trend of infrared search and track system [J]. Modern Defence Technology, 2003, 25(2): 95–101. (in Chinese)
刘忠领, 于振红, 李立仁, 等. 红外搜索跟踪系统的研究现状与发展趋势[J]. 现代防御技术, 2003, 25(2): 95–101.
- [9] Zhang Yunfei, Hu Mengyue, Lai Dexiong, et al. Simulation on aircraft infrared exposed range and detection probability [J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(2): 441–447. (in Chinese)
张云飞, 梦玥, 赖德雄, 等. 飞行器红外暴露距离及探测概率仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2016, 28(2): 441–447.
- [10] Wang Fang, Luo Huan, Wang Haiyan, et al. Research on effective detection area of airborne infrared search and tracking system [J]. Laser & Infrared, 2018, 48(5): 585–590. (in Chinese)
王芳, 罗寰, 王海晏, 等. 机载红外搜索跟踪系统有效探测区域研究[J]. 激光与红外, 2018, 48(5): 585–590.
- [11] Ma Youheng, Yao Linhai, Duan Hongjian, et al. Simulation evaluation of detection probability of air defense and antimissile electro-optical network [J]. Acta Armamentarii, 2022, 43(Suppl. 1): 169–176. (in Chinese)
马优恒, 姚林海, 段红建, 等. 防空反导光电组网探测概率仿真评估[J]. 兵工学报, 2022, 43(增刊1): 169–176.
- [12] Dang Hongjie, Yu Haozhang, Deng Luofeng, et al. Modeling and simulation of detection probability for whole airspace oriented optical target [J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(6): 1214–1220. (in Chinese)
党宏杰, 余浩章, 邓洛凤, 等. 面向全探测空域的光学目标探测概率建模与仿真[J]. 系统仿真学报, 2015, 27(6): 1214–1220.
- [13] Qi Meng. Detection probability of IR search and track system [J]. Laser & Infrared, 2004, 34(4): 269–271. (in Chinese)
祁蒙. 红外搜索跟踪系统的探测概率研究[J]. 激光与红外, 2004, 34(4): 269–271.
- [14] Jia Qinglian, Deng Wenyuan. Detection probability calculation of infrared warning system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 20(20): 1856–1861. (in Chinese)
贾庆莲, 邓文渊. 红外警戒系统的探测概率计算[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(10): 1856–1861.
- [15] Wu Hanping. Infrared search system [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013. (in Chinese)
吴晗平. 红外搜索系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.