

目标飞行高度和速度对红外探测的影响

易亚星^{1,2}, 姚梅¹, 吴军辉¹, 乐开端³

(1. 中国人民解放军63880部队, 河南 洛阳 471003; 2. 第二炮兵工程大学, 西安 710025;
3. 西安交通大学机械制造系统国家重点实验室, 西安 710049)

摘要: 首先定义了一个描述目标被探测的难易程度(隐蔽度)的物理量——可测度。分析了目标飞行高度和速度变化对目标红外波段可测度的影响,在大量计算的基础上分析了上述影响和变化的规律性。分析结果表明,目标飞行马赫数每提高0.5,探测距离就能增加大约5 km;目标在8 km以下时,其可测度随高度增加而增大;在8~10 km高度时目标的可测度值达到最大;高度超过10 km后,其可测度随高度增加而减小。

关键词: 红外告警; 目标探测; 可测度; 红外目标

中图分类号: V271; TN215 文献标志码: A 文章编号: 1671-637X(2013)11-0007-04

Influence of Target Flying Altitude and Velocity to Infrared Detection

YI Yaxing^{1,2}, YAO Mei¹, WU Junhui¹, YUE Kaiduan³

(1. No. 63880 Unit of PLA, Luoyang 471003, China; 2. The Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China;
3. The State Key Laboratory for Manufacturing, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Firstly, the definition of detectability was presented, which is a new physical quantifier used to describe the difficulty level for detecting a target. Analysis was given to the influence of target flight altitude and velocity on its detectability in infrared band, and the regularity of detectability changing was obtained based on a mount of simulating calculations. The analysis result shows that: 1) Under normal weather condition, the active detecting range will increase by 5 km for the same infrared detector when the speed of target improves by 0.5 Mach; 2) The detectability of a target will increase with the increasing of its flying height when the height is under 8 kilometers, decrease with the height when it is beyond 10 km, and reach the max at the height of 8 to 10 km.

Key words: IR warning; target detection; detectability; IR target

0 引言

在红外目标探测中,影响探测距离的因素很多^[1],目标特性^[2]与气象参数^[3]是最主要的因素。本文考虑目标的飞行高度和速度的变化所产生的一系列复杂的影响,从目标的辐射特性、有效探测面积、天空背景的大气辐射、光学路径的大气辐射和大气衰减等方面进行了分析,并针对某种典型条件进行了定量的计算。

1 目标可测度的定义

对于红外探测作用距离方程的推导,一般都是将点目标和面目标^[4]分别对待,为了将两者统一起来,本文提出有效视场的概念:目标进入探测器视场后,探测器视场由目标和背景覆盖,将探测器视场被目标覆盖的部分称为探测器对目标的有效视场。探测器单个像元对目标的有效视场,就是探测器单个像元的视场被目标覆盖的部分。在探测器视场大小、目标对探测器所张的立体角大小不变的情况下,目标可能覆盖的探测器单个像元的最大有效视场被称为探测器单个像元的最大有效视场。

一个目标能否被探测到,取决于3方面的因素:目

收稿日期:2012-12-19 修回日期:2012-12-27

基金项目:总装重大课题资助(2010SY331040)

作者简介:易亚星(1966—),男,湖南岳阳人,博士后,教授,研究方向为光电对抗。

标特性、环境因素和探测器本身的性能。不考虑探测器的因素,目前尚没有一个可以描述目标被探测到的难易程度(或者说目标的隐蔽程度)的物理量。为了便于对红外目标探测问题进行描述,本文定义一个新的物理量——可测度。

定义 在某种条件下,在探测器单个像元最大有效视场大小的立体角内,目标与背景对探测器的光谱辐照度之差的绝对值,被称为该条件下目标的光谱可测度;目标与背景在某个波段内对探测器的辐照度之差的绝对值,被称为该条件下目标在该波段的可测度。可测度的单位与辐照度单位相同,为 $W \cdot m^{-2}$ 。显然,目标的光谱可测度在某个波段的积分,就是目标在该波段的可测度。可测度的定义表示为

$$U(\lambda) = (N_t(\lambda) - N_b(\lambda)) \cdot \Omega \cdot \tau_a(\lambda) \quad (1)$$

$$U = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} U(\lambda) d\lambda = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (N_t(\lambda) - N_b(\lambda)) \cdot \Omega \cdot \tau_a(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

式中: $U(\lambda)$ 为光谱可测度; U 为 $(\lambda_1 \sim \lambda_2)$ 波段内的可测度; $N_t(\lambda)$ 为目标光谱辐射亮度; $N_b(\lambda)$ 为背景光谱辐射亮度; $\tau_a(\lambda)$ 为大气光谱透过率; Ω 为探测器单个像元的最大有效视场。

由于采用了最大有效视场来定义可测度,式(1)、式(2)同时适用于点目标和面目标。显然,在同等情况下,点目标的可测度小于面目标的可测度。式(2)是可测度的定义式,不便于计算,实际计算中可近似计算为

$$U = (N_t - N_b) \cdot \Omega \cdot \tau_a \quad (3)$$

式中: N_t 为目标的波段总辐射亮度; N_b 为背景的波段总辐射亮度; τ_a 为波段内大气平均透过率。

2 飞行高度和速度的变化对目标可测度的影响

假定大气条件不变,目标(以军用飞机为例)飞行速度不变,红外探测器在地面,目标面向探测器水平飞行。不同的飞行高度对可测度有怎样的影响呢?根据可测度的定义,影响可测度的有4个因素:目标的辐射亮度、背景的辐射亮度、路径的大气透过率和探测器单个像元的最大有效视场。下面分别考虑目标的飞行高度对这4个因素的影响。

2.1 目标的红外辐射亮度

由于飞机对探测器迎头飞行,尾喷管和排出的气流对探测器来说是不可见的,目标的红外辐射完全取决于飞机蒙皮的热辐射,其辐射亮度计算式为^[5]

$$N_t(\lambda) = \sigma \varepsilon_t T_t^4 \eta(\lambda) / \pi \quad (4)$$

式中: σ 为 Stefan-Boltzmann 系数($5.6696 \times 10^{-8} W \cdot m^{-2} K^{-4}$); ε_t 为目标的辐射发射率; T_t 为目标表面温

度; $\eta(\lambda)$ 为光谱辐射率。

目标表面温度计算式为

$$T_t = T_b \left(1 + r \cdot \frac{r' - 1}{2} \cdot M^2 \right) \quad (5)$$

式中: T_b 为环境温度; r 为恢复因子; r' 为空气的比热比; M 为目标飞行马赫数。

式(5)适用于马赫数10以下的目标表面温度计算,当马赫数超过10,则空气分子开始离解。取 $r = 0.82$, $r' = 1.4$,式(5)改写为

$$T_t = T_b (1 + 0.164 M^2) \quad (6)$$

在对流层内,随高度增加,大气温度按 $6.5 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{km}$ 递减;目标高度变化,其环境温度发生变化,进而影响目标温度。目标飞行速度变化,其表面气动加热效果发生变化也影响目标的温度。在本文假定的气象条件下,计算在不同高度和速度飞行时的目标的辐射亮度。

将目标视为灰体,其辐射发射率与波长无关,因而可以用黑体函数进行计算^[5]。

根据维恩位移定律,黑体光谱辐射峰值波长与温度之间的关系为

$$\lambda_m \cdot T = 2898 \text{ } \mu\text{m} \cdot \text{K} \quad (7)$$

令 $x_1 = \lambda_1 / \lambda_m$, $x_2 = \lambda_2 / \lambda_m$,利用黑体函数 $z = f(x)$ 进行计算,从黑体函数表中查得 $z(x_1)$ 和 $z(x_2)$,其计算式为

$$N_t = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} N_t(\lambda) d\lambda = [z(x_2) - z(x_1)] \sigma \varepsilon_t T_t^4 / \pi \quad (8)$$

具体计算过程为:首先根据目标速度和环境温度由式(6)计算出目标表面温度 T_t ;取目标的辐射发射率为 0.8 ^[6],由式(7)计算出目标的峰值波长 λ_m ;根据探测器的截止波长 $(\lambda_1 \sim \lambda_2)$ 计算出 $x_1 = \lambda_1 / \lambda_m$, $x_2 = \lambda_2 / \lambda_m$ 后,查黑体函数表^[5]得到 $z(x_1)$ 和 $z(x_2)$,并根据式(8)计算出波段辐射亮度 N_t 。图1是不同飞行速度时的目标红外辐射亮度,当目标速度增大时,由于气动加热效果增强,目标的辐射亮度增大。当目标速度不变而高度增大时,由于大气温度降低,目标温度也随之降低,从而使目标的辐射亮度降低。

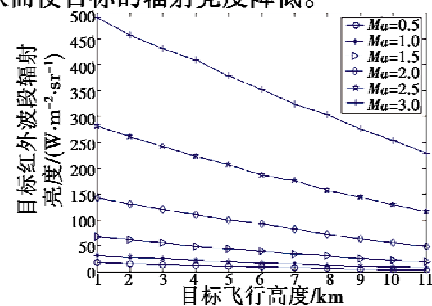


图1 不同飞行速度时的目标红外辐射亮度
Fig. 1 Infrared radiation of target versus flight height at different velocity

2.2 背景的红外辐射亮度

在本文假定的气象条件下,对于天空背景的红外辐射亮度,用 LOWTRAN 软件包进行计算。当目标与探测器间的距离(斜程)分别为 15 km、20 km、25 km,计算结果如图 2 所示。显然随着高度增大,大气温度降低,其红外辐射亮度变小。背景辐射亮度还与观测角度有关,在相同的高度,观测天顶角增大时,背景辐射亮度增大。

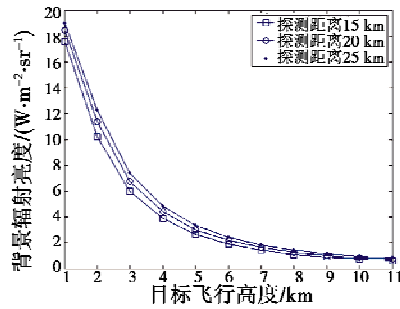


图 2 背景的波段辐射亮度

Fig. 2 Radiation of background versus flight height at different detection range

随着高度的增大,目标和背景的红外辐射亮度都降低,但降低的速率不同。当目标飞行马赫数为 1 时,目标与背景的亮度差在高度为 3 km 时最大,如图 3 所示。探测距离为 15 km、20 km、25 km 时目标和背景的这种对比特性相似。当目标速度变化时,目标与背景的对比特性也发生变化,图 4 描绘了在不同的目标飞行速度时,目标与背景的亮度差随飞行高度变化的曲线。

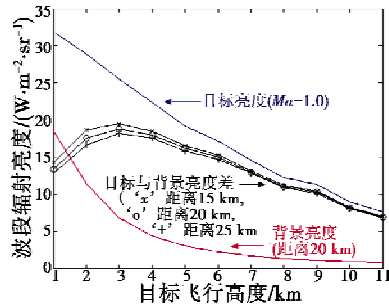


图 3 目标和背景的红外辐射亮度及其差值

Fig. 3 Infrared radiation of target and background at different detection range

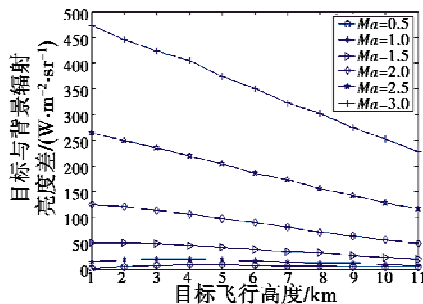


图 4 目标和背景的波段辐射亮度差

Fig. 4 Radiation difference between target and background at different velocity

2.3 路径红外波段透过率

在同样的条件下,用 LOWTRAN 软件包^[7]计算出波段内路径的大气平均透过率如图 5 所示。计算结果表明,尽管距离不变,目标愈高,大气对目标辐射的衰减愈小。

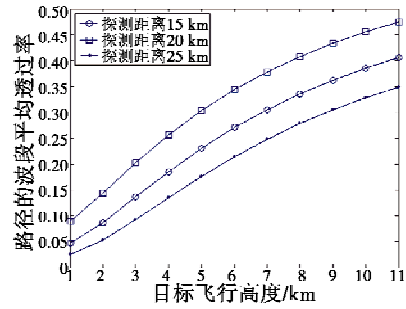


图 5 不同高度斜程的红外波段透过率

Fig. 5 Average transmittance versus flight height at different detection range

2.4 探测单元的最大有效视场

取探测器单个像元的视场为一特定值,以某型军用飞机为例计算目标对探测器单个像元的最大有效视场。具体的计算方法为:首先根据给定的视场范围、距离和方向,确定目标最大可能的探测面积,用该面积除以距离的平方就得到最大有效视场。计算结果如图 6 所示。目标探测距离增大时,探测器单元的最大有效视场减小。当距离不变而目标高度增加时,由于观测角度发生变化,目标的有效探测面积增大,从而使探测单元的最大有效视场增大。

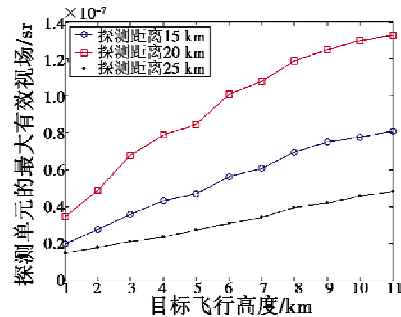


图 6 探测单元的最大有效视场

Fig. 6 Maximum effective field of a detective unit versus flight height at different detection range

2.5 可测度

由于目标高度和速度变化,影响可测度的各项因素都随之发生变化。图 7 描绘了探测距离为 20 km 时,不同飞行速度下的目标的可测度随飞行高度变化的曲线。从中可以看出,目标在 8 km 以下时,其可测度随高度增加而增大;在 8 ~ 10 km 高度时目标的可测度值达到最大。或者说,在 8 km 以下高度时,目标飞行高度越低,其红外隐蔽性越好;高度超过 10 km 后,

高度越高红外隐蔽性越好。要特别指出的是,本文的计算只考虑了飞机蒙皮由大气加热所产生的热辐射,没有考虑飞机发动机和尾喷焰的热辐射。由于飞机尾喷焰的温度远高于蒙皮温度,如果考虑喷焰辐射,飞机高度增加使尾喷焰变得可见时,飞机随高度增加而可测度增大的趋势将大大增强。

图8分别给出探测距离为15 km、20 km、25 km时,不同飞行速度下的目标可测度随飞行高度变化的曲线。通过飞行马赫数相差0.5的两组曲线对比可以看出:目标飞行马赫数每提高0.5,探测距离就增加大约5 km。

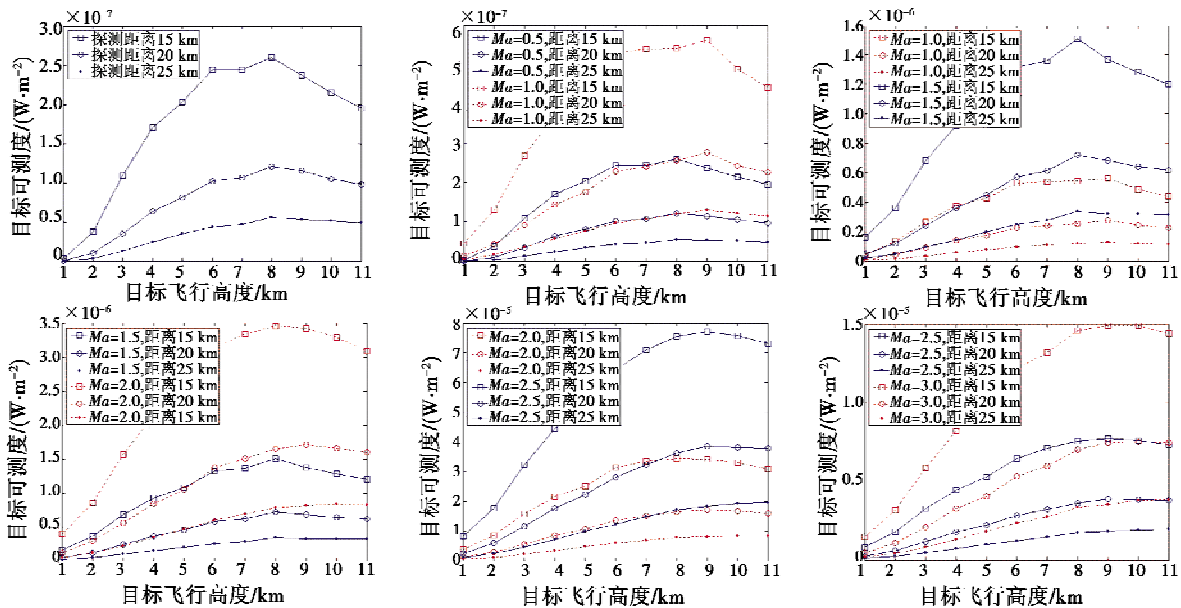


图8 不同速度和高度的目标的可测度

Fig. 8 Detectability at different velocity and height

2.6 等可测度曲线

在大量计算的基础上,可以绘制出等可测度曲线,图9是在本文假定气象条件下某型军用飞机的三条等可测度曲线。曲线显示,目标飞行高度对可测度的影响是非常可观的。当飞机飞行高度为9 km时,如果红外探测器发现目标的距离为25 km,则飞行高度降为2 km时,发现目标的距离降为15 km。

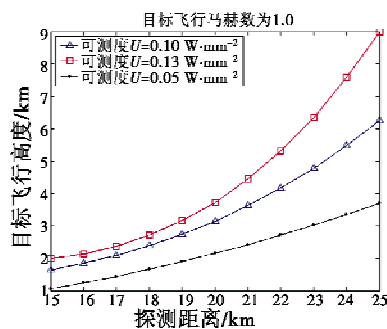


图9 等可测度曲线

Fig. 9 Contour detectability curves

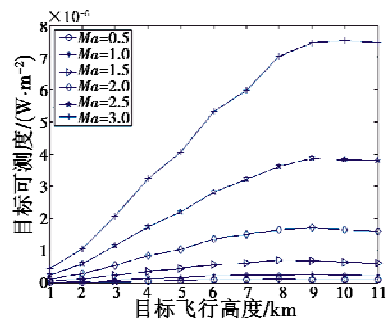


图7 探测距离为20 km时目标的可测度

Fig. 7 Target detectability when detection range is 20 km

3 结束语

本文定义红外目标可测度的概念,通过大量的计算,分析了在气象条件不变的情况下目标飞行速度和高度对可测度的影响及其规律。目标的飞行速度直接影响目标表面的气动加热,从而影响目标的辐射亮度。飞行速度愈高,目标的红外辐射亮度愈大,其可测度也愈大。目标飞行马赫数每提高0.5,探测距离就能增加大约5 km。目标的飞行高度对目标辐射亮度、背景辐射亮度、路径的大气透过率以及探测器单个像元的最大有效视场均有影响,对可测度有十分显著的影响。目标在8 km以下时,其可测度随高度增加而增大;在8~10 km高度时,目标的可测度值达到最大。或者说,在8 km以下高度时,目标飞行高度越低,其红外隐蔽性越好;高度超过10 km后,高度越高红外隐蔽性越好。

(下转第20页)

偿;引入了线性跟踪-微分器解决了增量动态逆控制律所需状态速率无法测量的问题;分别对快慢回路设计了增量动态逆控制律,期望动力学采用了抗干扰能力和收敛速度快的非光滑控制律,提高了系统的鲁棒性。最后,通过仿真验证了所提算法的有效性。

参 考 文 献

- [1] HARPOLD J. Shuttle entry guidance [J]. *Journal of the Astronautical Sciences*, 1979, 28(3):239-268.
- [2] SHTESSEL Y B, CHARLES E H. Reusable launch vehicle control in multiple-time scale sliding modes [J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2000, 23(6):1013-1020.
- [3] JENNIFER G, JOHN V. Evaluation of longitudinal desired dynamics for dynamic-inversion controlled generic reentry vehicles [J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2003, 26(5):811-819.
- [4] SHTESSEL Y B, MCDUFFIE J. Sliding mode control of the X-33 vehicle in launch and re-entry modes [J]. NASA-AIAA-98-4414. A98-37139.
- [5] CHARLES E H, YURI B S. Sliding mode disturbance observer-based control for a reusable launch vehicle [J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2006, 29(6):1315-1328.
- [6] 杨俊春,胡军,吕孝乐.高超声速飞行器再入段跟踪控制设计[C]//第26届中国控制会议,湖南张家界,2007:1-5.
- [7] RACHID E, MOHAND O, CHEN Wenhua. Robust cascaded nonlinear predictive control of a permanent magnet synchronous motor with antiwindup compensator [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2012, 59(8):3078-3088.
- [8] SIMPLICIO P, PAVEL M D, VAN KAMPEN E, et al. An acceleration measurements-based approach for helicopter nonlinear flight control using Incremental Nonlinear Dynamic Inversion [J]. *Control Engineering Practice*, 2013, 21(8):1065-1077.
- [9] 陈海兵,张曙光,方振平.加速度反馈的隐式动态逆鲁棒非线性控制律设计[J]. *航空学报*, 2009, 30(4):597-603.
- [10] DING Shihong, LI Shihua, ZHENG Weixing. Nonsmooth stabilization of a class of nonlinear cascaded systems [J]. *Automatica*, 2012, 48(10):2597-2606.
- [11] DING Shihong, LI Shihua, LI Qi. Adaptive set stabilization of the attitude of a rigid spacecraft without angular velocity measurements [J]. *Journal of Systems Science and Complexity*, 2011, 24(1):105-119.
- [12] ITO D. Robust dynamic inversion controller design and analysis (using the X-38 vehicle as a case study) [D]. Houston: Department of Aerospace Engineering, Texas A & M University, 2001.
- [13] ERT S U, GÖRLACH T, ROENNEKE A. German contribution to the X-38 CRV demonstrator in the field of guidance, navigation and control [J]. *Acta Astronautica*, 2004, 56(8):737-749.
- [14] JULIANA S, CHU Q P, MULDER A. Reentry flight clearance using interval analysis [J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2008, 31(5):1295-1307.
- [15] 韩京清. 自抗扰控制技术 [M]. 北京:国防工业出版社, 2008.
- [16] 李志刚,王宝光,杜振辉,等.激光多普勒信号跟踪微分器的分析与设计 [J]. *电子科技大学学报*, 2004, 33(4):453-456.
- [17] SHAHRIAR K. Six-DOF modeling and simulation of a generic hypersonic vehicle for conceptual design studies [C]//Modeling and Simulation Conference, Chicago, USA, 16 August 2004-19. AIAA, 2004-4805.

(上接第10页)

参 考 文 献

- [1] 宋敏敏. 红外系统作用距离与影响关系因素的研究 [D]. 南京:南京航空航天大学, 2010.
- [2] 高思峰. 飞行器红外特征分析与红外热成像系统作用距离的预估方法 [D]. 南京:南京航空航天大学, 2007.
- [3] 易亚星,姚梅,王国玉,等. 大气参数对红外目标可测度的影响分析 [J]. *红外技术*, 2006, 28(2):120-123.
- [4] 宣益民,韩玉阁. 地面目标和背景的热红外特性 [M]. 北京:国防工业出版社, 2004:50-60.
- [5] 张敬贤,李玉丹,金伟其,等. 微光与红外成像技术 [M]. 北京:北京理工大学出版社, 1995:45-60.
- [6] 廖猛蛟. 飞机红外辐射图像生成、仿真与传输研究 [D]. 西安:西北工业大学, 2001:60-70.
- [7] 吴北婴,李卫,陈洪滨,等. 大气辐射传输实用算法 [M]. 北京:气象出版社, 1998:21-30.